

Programació dinàmica de vols atenent a demandes estocàstiques

Treball de Fi de Grau

Memòria del Treball de Fi de Grau
en Gestió Aeronàutica

realitzat per

Armand Carmona Budesca

i dirigit per

Dr. Angel A. Juan Pérez

Sabadell, a 8 de Juliol de 2013

Índex

0. Resum.....	13
---------------	----

SECCIÓ 1 - INTRODUCCIÓ

1. Introducció	
1.1. Interès i motivació.....	17
1.2. Objectius globals i parcials del projecte.....	18
1.2.1. Objectius globals.....	18
1.2.2. Objectius parcials.....	19
1.3. Metodologia.....	20

SECCIÓ 2 – BASE TEÒRICA I EVOLUCIÓ DEL PROBLEMA

2. Marc conceptual	
2.1. Disseny del programa de vols.....	25
2.2. Assignació de flotes (FAP).....	26
2.3. Planificació de les tripulacions.....	26
2.4. Planificació del manteniment i matriculació de vols	27
3. Revisió de la literatura	
3.1. Evolució històrica del problema.....	27
3.2. Jiang (2006).....	32

SECCIÓ 3 – METODOLOGIA DE RESOLUCIÓ: ALGORTIME DACRA

4. Descripció detallada del problema i presentació de la metodologia de resolució proposada	
4.1. Introducció.....	43
4.2. Inputs.....	44
4.3. Mercats.....	50
4.4. Definició de la funció objectiu	51

4.5. Tipus de canvis.....	53
4.5.1. Canvis en els horaris dels vols (<i>retiming</i>).....	53
4.5.2. Canvis en el tipus d'avió assignat a cada vol (<i>refleeting</i>).....	56
5. Implementació i explicació de l'algoritme.....	60

SECCIÓ 4 – EXPERIMENTS I ANÀLISI DE RESULTATS

6. Experiments: disseny, execució i anàlisi de resultats	
6.1. Introducció.....	71
6.2. Experiments.....	72

SECCIÓ 5 – CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR

7. Conclusions.....	83
8. Futures línies de treball.....	85
9. Referències bibliogràfiques.....	87
10. Annex.....	89

0. Resum

La programació de vols és una de les principals activitats de planificació que es duen a terme en una companyia aèria; el resultat d'aquesta tasca té implicacions que transgredeixen l'àmbit operacional i esdevé un factor determinant de cara a millorar la competitivitat en el sector del transport aeri.

Sovint, la naturalesa estratègica d'aquesta activitat implica que es realitzi a una antelació en què la previsió respecte la demanda de passatgers és força difusa i pot resultar, el dia d'operació dels vols, en manques d'eficiència al deixar vols amb seients buits i a l'haver-ne assignat d'altres amb avions de massa poca capacitat.

Així doncs, en aquest projecte es presenta una metodologia (algoritme DACRA) que executant petites alteracions sobre la planificació de vols inicial, realitza ajustaments de capacitat, possibilitant l'adaptació contínua del programa de vols a les actualitzacions disponibles respecte la previsió de demanda de passatgers per a una data concreta, tot millorant-ne els beneficis operatius i preservant que les noves solucions generades siguin operativament factibles.

SECCIÓ 1 - INTRODUCCIÓ

1. Introducció

1.1. Interès i motivació

La programació de vols és el punt de partida de totes les activitats de planificació que es duen a terme en una companyia aèria (Bazargan, 2010). La naturalesa estratègica d'aquesta activitat justifica doncs, el fet que es realitzi amb prou antelació per a poder iniciar la resta d'activitats de planificació; generalment, un any abans de la sortida del vol (Warburg et al. 2008). A aquesta antelació, prendre decisions sobre quins mercats servir, a quins horaris servir-los i quina capacitat oferir, es realitza sobre previsions poc nítides i força incertes respecte la demanda de passatgers per a cadascun dels vols que conformen la xarxa de rutes de la companyia en qüestió. Berge i Hopperstad (1993) quantifiquen la variabilitat de la demanda en una desviació típica que oscil·la entre un 20 i un 50 % de la mitja de passatgers previstos per a cada vol .

Així doncs, en una indústria amb un entorn competitiu cada cop més agressiu i uns mercats altament congestionats, “la naturalesa estocàstica de la demanda per al transport aeri, esdevé un dels principals reptes per a les aerolínies de cara a produir programes de vols que maximitzin els ingressos generats per l'activitat del transport aeri” (Jiang, 2006).

Una manera de fer front a aquesta incertesa respecte la demanda de passatgers i assolir una assignació òptima de capacitat en cadascun dels vols programats, consisteix en adaptar el programa de vols a mesura que s'aconsegueix una major visibilitat respecte la demanda prevista de passatgers; això és, en el període en què el programa de vols es comercialitza (des de que es publica fins a la sortida del vol) (Jiang, 2006). Amb aquest objectiu, s'aplica el concepte de “programació dinàmica de vols” que com cita Jiang (2006), fou primerament discutit per Etschmaier i Mathaisel (1984) i Peterson (1986).

La programació dinàmica de vols, tal i com s'ha estudiat fins al moment, consisteix doncs, en l'aplicació de petites modificacions sobre el programa de vols durant el seu període de comercialització (Jiang , 2006), quan la qualitat de les previsions de la demanda milloren. Són dos els tipus de canvis que fins al moment, s'han estudiat: d'una banda, s'avaluen canvis sobre el tipus d'aeronau assignada a cada vol (reassignació de flota) i de l'altra, es consideren alteracions sobre les hores d'arribada i de sortida dels vols.

Amb tot, si bé la literatura científica revisada en aquest projecte concorda en que els efectes de l'aplicació de la programació dinàmica de vols resulta en un percentatge incremental sobre el marge net de les companyies aèries, no es possible resumir en una dada concreta el benefici empíric d'aquesta pràctica. Els beneficis derivats de l'aplicació de la programació dinàmica de vols dependran en gran

mesura, de les característiques particulars de cada operador aeri. Factors com l'estructura de la xarxa de rutes (punt a punt, *banked hub and spoke*, *de-banked hub and spoke...*), la diversitat de famílies que componen la flota, programació de les escales, contractes i centres de manteniment, mercats servits, i fins i tot, convenis de tripulacions, són elements que tenen un gran impacte sobre els efectes de l'aplicació d'aquesta metodologia. No obstant aquesta variabilitat en les conclusions dels estudis revisats, és clar que el problema de la programació dinàmica de vols és un factor absolutament clau de cara a maximitzar els beneficis d'una aerolínia i produir programes de vol econòmicament rendibles. Així doncs, i només per citar algun exemple, Jiang (2006) demostra que l'aplicació d'aquesta metodologia millora els beneficis operatius d'una companyia aèria entre un 2,5-5 %, o el que és el mateix, un increment dels beneficis operatius nets de 18-36 M\$ anuals.

Amb tot, aquesta és una pràctica que obre clarament una nova escletxa de competència donada la naturalesa canviant de l'entorn en què actualment operen les companyies aèries i pot esdevenir cada cop més, un factor de diferenciació de cara a assolir un millor posicionament en el mercat.

1.2. Objectius globals i parcials del projecte

1.2.1. Objectius globals

A partir de l'anàlisi de les fonts bibliogràfiques i de l'estudi de les tècniques desenvolupades per a adreçar diferents aspectes relacionats amb la programació de vols i l'assignació de capacitat atenent a demandes canviants, es planteja com a objectiu principal d'aquest projecte **desenvolupar una metodologia que permeti adaptar el programa de vols d'una companyia aèria als canvis en la predicció de demanda de passatgers maximitzant-ne els beneficis i assegurant que sigui operativament factible.**

Assolir aquest objectiu permetrà poder realitzar experiments sobre diferents escenaris que permetin exemplificar i derivar resultats concrets sobre quins són els potencials d'adoptar una actitud flexible vers a la realització de canvis sobre la programació de vols al llarg del temps, respecte un escenari en que el programa de vols romangui inalterat. D'aquesta manera, d'una banda es pretén aportar evidències empíriques que reforcin la difusió d'aquesta pràctica i de l'altra, es busca desenvolupar una metodologia innovadora i original que serveixi com a alternativa de resolució a les pràctiques utilitzades fins al moment.

1.2.2. Objectius parcials

Per tal d'assolir l'objectiu global, es defineixen a continuació un sèrie d'objectius parcials que conformaran el conjunt de fites a curt termini necessàries per a definir una metodologia eficient per a donar resposta al problema plantejat. S'enumeren a continuació els objectius parcials del projecte:

1. **Estudiar i definir el procés de programació de vols d'una companyia aèria:** Serà necessari, per tal de poder abordar el problema amb precisió, conèixer exactament en què consisteix el procés de programació de vols, quins elements hi intervenen i de quina forma està relacionat amb els altres processos de planificació que es duen a terme en una companyia aèria.
2. **Identificar i definir el conjunt de restriccions que afecten l'activitat de programació de vols:** Per tal de garantir que les modificacions que s'executin sobre la programació de vols inicials no alterin el fet que sigui operativament factible, caldrà conèixer el conjunt de restriccions que afecten aquesta activitat. Serà de particular interès, estudiar les restriccions imposades per l'activitat de planificació de vols (en particular, de les escales) així com altres restriccions que es puguin derivar de limitacions operatives dels aeroports o bé relacionades amb altres activitats de planificació com la programació de tripulacions (*crew rostering*) o la programació del manteniment dels avions que componen la flota.
3. **Definir un algoritme que executi canvis sobre el programa de vols per tal d'ajustar la capacitat oferta a la previsió de demanda actualitzada per a cada mercat i en maximitzi els beneficis totals derivats:** Com a pilar central del projecte i principal contribució, es definirà i programarà un algoritme que, partint de la darrera versió disponible del programa de vols i prenent com a principal input la previsió actualitzada de demanda per a cadascun dels mercats servits per la aerolínia en qüestió en una data concreta, avalui i executi petits canvis (pertorbacions) sobre la solució inicial per tal d'assolir un millor ajustament de la capacitat assignada en cadascun dels vols que componen el programa, tenint en compte la previsió actualitzada de la demanda de passatgers esperats per a cada vol així com les previsions d'ingrés mig per tarifa. Evidentment, caldrà definir d'altra banda, una funció objectiu que permeti valorar la millora resultant de l'aplicació d'aquesta metodologia i poder derivar d'aquesta manera, una estimació de l'increment dels beneficis operatius generats per la nova versió del programa de vols.

4. **Dissenyar i executar un programa d'experiments que permeti identificar i quantificar el potencial de la programació dinàmica de vols:** Per tal de quantificar el resultat de la metodologia definida, es definiran una sèrie d'experiments que possibilitin l'extracció de resultats i permetin el seu posterior anàlisi i extracció de conclusions.

1.3. Metodologia

Resulta necessari definir una metodologia que possibiliti l'assoliment dels objectius parcials definits anteriorment i d'aquesta manera, donar resposta a l'objectiu global plantejat en el projecte.

Com a base de partida, serà imprescindible realitzar una recerca bibliogràfica sobre quines han estat les aproximacions realitzades al problema de la programació dinàmica de vols i de quina forma s'hi ha donat resposta així com altres estudis relacionats amb l'assignació de capacitat atenent a demandes canviants. Es dedicarà un apartat de la memòria a realitzar una revisió de l'estat de l'art que serveixi com a base per a conèixer amb precisió el problema a tractar i poder realitzar una contribució original en la metodologia de resolució del problema.

Es consultaran, per tal de satisfer aquest propòsit, bases de dades documentals i revistes electròniques així com edicions en paper a partir dels recursos que la universitat posa a disposició dels estudiants: biblioteques, bases de dades, revistes...

Un cop estudiat el problema a resoldre i contant amb la base teòrica necessària que permeti realitzar una definició clara i precisa, es dissenyarà i implementarà un algoritme que permeti generar solucions pseudo-òptimes al problema estudiat en temps de còmput raonables. Per tal d'adreçar aquest propòsit, caldrà identificar de forma clara quins seran els inputs necessaris, definir i aclarir el conjunt de conceptes fonamentals així com formular la funció objectiu que serveixi com a criteri de discriminació de solucions, i formalitzar mitjançant l'elaboració d'un diagrama de flux, la seqüència de passos que defineixen la meta heurística. Amb això, es comptarà amb la base formal necessària per a poder implementar l'algoritme plantejat en algun llenguatge de programació: en aquest cas, s'ha desenvolupat el codi en el llenguatge JAVA utilitzant el programador NetBeans IDE 7.3. Es mostra a la següent figura Fig. 1.1. un exemple de l'entorn en el qual s'ha desenvolupat l'algoritme.

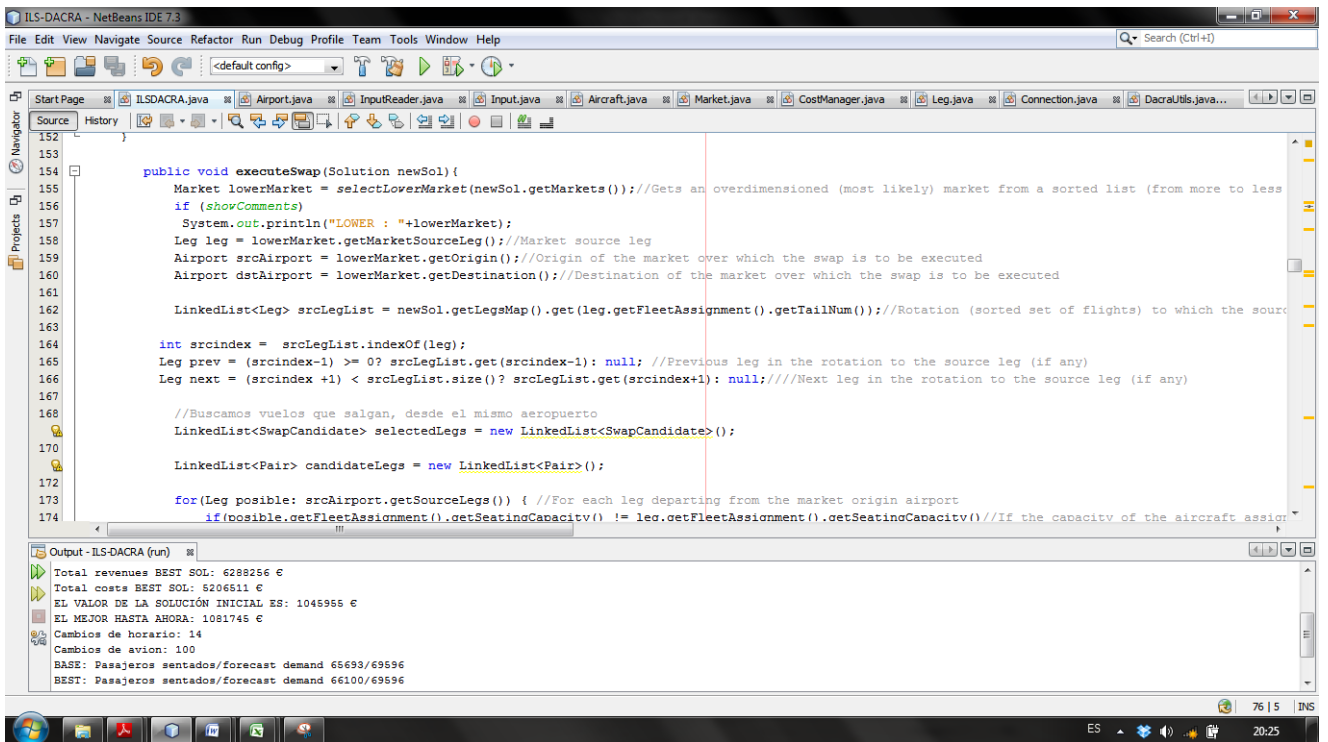


Fig. 1.1. Entorn de programació Netbeans IDE 7.3

Es realitzaran al llarg del projecte, el conjunt d'entregues parcials i reunions amb el tutor que permetin discutir i avaluar el progrés del projecte així com planificar i executar el conjunt d'accions correctives que permetin assolir els objectius plantejats en el terminis de temps establerts.

SECCIÓ 2 – BASE TEÒRICA I EVOLUCIÓ DEL PROBLEMA

2. Marc conceptual

Per tal de poder abordar amb major precisió el problema de la programació dinàmica de vols i donat que les metodologies que s'estudiaran i desenvoluparan prenen com a base principal el programa de vols d'una companyia aèria, resulta necessari dedicar un apartat que descrigui en què consisteix aquest procés i quines activitats hi té associades. Amb tot, es disposarà d'un marc conceptual que limitarà alguns dels aspectes a tenir en compte a l'hora de dissenyar la metodologia proposada en aquest treball.

A nivell agregat, el conjunt d'activitats que componen el procés de planificació d'una companyia aèria, generen el pilar central de la seva estratègia al fixar el conjunt de mercats als quals adreçar-se, amb quina freqüència servir-los i en quins horaris fer-ho. Tot això, s'ha d'aconseguir respectant el conjunt de restriccions tant operatives com de personal de vol que afecten aquest resultat. Per a fer-ho, es duen a terme les següents activitats:

2.1. Disseny del programa de vols

Partint dels resultats de l'anàlisi històric de rutes, els canvis en l'entorn competitiu i en la capacitat dels mercats, els plans de creixement de la companyia aèria i altres criteris i previsions estratègiques sovint aportades pel departament de planificació de rutes de la companyia, aquesta activitat consisteix en definir el conjunt de vols (*legs*) a operar, els horaris de sortida i arribada de cada vol així com la repartició setmanal de freqüències per a cadascun dels vols.

El resultat d'aquesta activitat defineix la essència del producte de la companyia aèria: conjunt d'enllaços entre aeroports d'origen i destí, horaris i freqüències setmanals. Sovint, aquesta és una activitat que es duu a terme amb una antelació d'entre 18 i 12 mesos abans de la sortida dels vols i es realitza per períodes de demanda coneguts (i.e. temporades *winter/summer (pre-peak, peak, post-peak)*, festivitats puntuals, esdeveniments esportius massius...). Evidentment, a aquesta antelació les previsions respecte de la demanda de passatgers es basen en dades històriques i poden distar força de la realitat; és d'aquest premissa que la programació dinàmica de vols aconsegueix el seu potencial.

La programació de vols és doncs, l'element fonamental sobre el qual es sustenten la resta d'activitats de planificació de qualsevol companyia aèria.

2.2. Assignació de flotes (FAP)

Un cop s'ha definit el conjunt de vols a operar, cal assignar un tipus d'avió a cada vol amb l'objectiu de maximitzar els ingressos potencials generats en cada vol; així doncs, aquesta activitat té per objectiu buscar una assignació òptima de capacitat (nombre de seients) en cada vol en relació a la demanda de passatgers prevista. Com es presentarà més endavant, part de la metodologia de programació dinàmica de vols buscarà fer canvis en aquesta assignació inicial per tal de millorar l'ajustament de capacitat a mesura que es disposa de millors prediccions en relació a la demanda de passatgers.

Aquesta és una activitat que més enllà de la dificultat inherent al fet d'assignar capacitat a mercats respecte dels quals es disposa de poca informació, té una sèrie de restriccions afegides com el fet de que la flota està limitada als tipus d'aeronau de que disposa la companyia i també a la necessitat de conservar un balanç de cada tipus d'avió a cada aeroport base. Aquest darrer, és un factor clau de cara a garantir que el programa de vols sigui operativament factible ja que permet garantir la disponibilitat de la mateixa quantitat de cada tipus a cadascun dels aeroports en els quals la companyia aèria hi té una base; amb això, s'aconsegueix un enllaç coherent amb la programació de vols dissenyada pel període consecutiu.

2.3. Planificació de tripulacions

De forma similar al problema de l'assignació de flotes, aquesta activitat té per objectiu assignar les tripulacions (tant auxiliars com tècniques) que han d'operar cadascun dels vols planificats en l'etapa de programació de vols de forma que es minimitzin els costos. Aquest és un problema molt complex i darrere del qual s'han dut a terme molts esforços d'investigació degut a l'elevat nombre de restriccions que l'afecten. Per a dur a terme aquesta activitat s'han de tenir en compte aspectes com els períodes d'activitat màxim que regulen els convenis col·lectius, els descansos obligatoris, períodes no lectius o de formació, certificacions de tipus d'aeronau, bases...

La programació de tripulacions se sol fer a una antelació pròxima a un mes abans de la sortida del vol.

2.4. Planificació del manteniment i matriculació de vols

Un cop ja s'ha assignat el tipus d'avió que ha d'operar cada vol del programa, cal seleccionar específicament quin dels avions (matrícula) que componen la flota servirà cada vol. Per a fer-ho, s'hauran de tenir en compte les necessitats de manteniment i revisions obligatòries per a cada avió així com els temps d'escala necessaris i *checks* rutinaris que s'hagin de realitzar.

El resultat d'aquesta activitat definirà el conjunt de rotacions que componen el programa de vols; és a dir, la seqüència ordenada de vols (salts) que haurà d'operar cada avió programat.

Aquesta activitat es realitza a una antelació "operativa" en què es coneix l'estat de cadascun dels aparells que componen la flota; sovint, la mateixa setmana de la sortida del vol.

3. Revisió de la literatura

3.1. Evolució històrica del problema

És necessari, per tal de dur a terme l'estudi que es proposa en aquest projecte i assolir els objectius plantejats, disposar d'una visió cronològica sobre quin ha estat l'origen del problema, quines aportacions s'hi han fet i quin és l'estat actual de la qüestió.

Són molts els autors que, potser referint-s'hi amb altres denominacions, han establert les bases necessàries i han obert els camins d'investigació que han portat a discutir el problema de la programació dinàmica de vols tal i com l'entenem avui en dia.

Les primeres referències al problema de la programació dinàmica de vols es troben, com indica Jiang (2006), a l'article "Airline Scheduling: An Overview" publicat l'any 1984 per Etschmaier i Mathaisel (Etschmaier i Mathaisel (1984)). En aquest estudi ja s'identifica la programació dinàmica de vols com "una filosofia emergent entre els principals operadors aeris per tal d'ajustar la capacitat oferta a mida que evoluciona la demanda i generar una programació de vols exacta".

Peterson (1986) enceta el problema de l'assignació de capacitat de forma dinàmica amb un enfocament que, com veurem, ha estat el predominant per a fer front a aquest problema en gran part dels articles revisats. La metodologia presentada en el seu treball consisteix en la reassignació de flotes, a mida que s'actualitzen les prediccions de la demanda, per a aconseguir un millor ajustament de la capacitat

assignant diferents tipus d'aeronau a cada vol; en aquest sentit, la metodologia consisteix en una revisió i actualització del *fleet assignment problem* (FAP).

En aquesta mateixa línia, Berge i Hopperstad (1993) presenten un concepte operatiu que bategen amb el nom de Demand Driven Dispatch (D^3) i que, partint de la premissa apuntada per Peterson (1986) de que les prediccions de la demanda milloren significativament a mida que s'acosta la sortida del vol, realitzen una assignació dinàmica dels avions a cadascun dels vols per a aconseguir un balanç òptim entre la oferta i la demanda. La seva contribució a aquesta metodologia consisteix en emfatitzar el fet d'agrupar els diferents avions que conformen la flota en *famílies* i restringir els canvis en l'assignació d'un avió per un altre a membres de la mateixa *família*. El que s'aconsegueix amb aquesta mesura és no trencar amb les assignacions de tripulacions realitzades per a cada vol (*crew scheduling*), ja que les certificacions de les tripulacions són vàlides per a diferents models d'avions dins d'una mateixa família, i poder treballar l'assignació de flota de forma aïllada. La metodologia de resolució proposada es serveix de les tècniques de programació lineal i teoria de fluxos sobre xarxes per a donar solució al problema. Berge i Hopperstad (1993) resumeixen la contribució de l'aplicació del D^3 en un increment del 1-5 % en els beneficis operatius.

Tot i que el denominador comú de qualsevol model d'assignació de flota consisteix en cercar l'assignació dels tipus d'avions, per a cada vol, que maximitzin els beneficis, Knicker (2000) critica que molts dels models desenvolupats anteriorment ofereixen solucions pseudo-òptimes ja que no tenen en compte efectes importants que es produeixen en les xarxes de rutes que operen les companyies aèries i que són essencials com a criteri d'assignació de capacitats. Si l'objectiu és maximitzar els beneficis, minimitzant els costos d'assignació¹, Knicker troba a faltar una bona modelització d'aquests. En aquest sentit, posa especial dedicació en desenvolupar una aproximació més realista de l'anomenat *spill cost*; és a dir, la quantitat d'ingressos "perduts" que es dona quan l'assignació de l'avió per a un vol concret, deixa sense acomodar un conjunt de passatgers. En aquest cas, Knicker (2000) contempla dos escenaris: d'una banda, la possibilitat que aquests passatgers siguin acomodats en altres vols dins de la xarxa de la companyia (*recapture*) o, que siguin atesos per la competència. La metodologia d'assignació de flota que anomena *Itinerary Based Fleet Assignment Model* constitueix una contribució essencial a les bases de resolució d'aquest problema ja que introdueix l'anomenat Passenger Mix Model (PMM) per tal de tenir en compte els efectes de xarxa que influeixen sobre els nivells de *spill* i *recapture* que un operador aeri contrau al realitzar certes assignacions de capacitat, tenint en compte la demanda esperada per a cadascun dels itineraris. Amb això, possibilita un aproximació molt més realista en què

¹ Costos d'assignació = Costos operatius + costos de passatgers + *spill cost*

només una porció dels passatgers que no poden ser acomodats en els seus vols desitjats, estàn disposats a acceptar una plaça en un vol alternatiu dins de la xarxa de la companyia.

El Passenger Mix Model (PMM), estudiat abans de Knicker per autors com Soumis (1981), Glover (1982) o Farkas(1995) és un component fonamental de cara a solucionar el problema de la programació dinàmica de vols ja que permet assignar els passatgers al conjunt de vols que conformen el programa, maximitzant els ingressos per tarifa i “deixant anar” (*spilling*) aquells passatgers menys atractius, sempre assegurant que:

1. El total de passatgers assignats a cada vol no excedeix la capacitat de l'avió que li ha estat assignat.
2. El nombre total de passatgers, per a cada itinerari, no excedeix la demanda prevista per aquest itinerari.

Fortament relacionat amb els treballs presentats anteriorment, a Bish et al. (2004) es realitza un estudi respecte quins són els beneficis derivats de la metodologia que els autors anomenen Demand Driven Swapping (DDS). Si bé són varis els treballs basats en les reassignacions de flota, l'article critica que el problema de l'assignació dinàmica de capacitat ha gaudit de major atenció des d'una perspectiva de *gestió de la demanda* (tècniques com el *yield management* o el *revenue management*) i no s'ha donat massa projecció a tècniques relacionades amb la *gestió de la oferta*. A més, l'aportació de Bish et al. (2004) resulta de gran valor ja que garanteix l'harmonia sobre les altres activitats de programació (FAP i *crew scheduling*) al basar les reassignacions de flota en el concepte de *swap*; és a dir, busca oportunitats paral·leles en l'assignació inicial de flota de manera que l'intercanvi simultani de tipus d'avió resulti en un benefici global. Des d'aquesta perspectiva, el treball és innovador ja que estudia diferents estratègies DDS que s'aprofiten de les característiques de flexibilitat inherents que hi ha en els programes de vols en determinats moments, per a realitzar reassignacions que millorin l'ajustament de la oferta amb les prediccions de demanda actualitzades, alhora que minimitzen les disruptcions tàctiques que aquestes alteracions puguin causar. Les estratègies que els autors proposen i que finalment avaluen a través de la simulació i basant-se en dades reals són les següents:

- **Estratègia de *swapping* limitada:** La decisió respecte el conjunt de canvis (*swaps*) a executar es realitza un sol cop, en un moment determinat, basada amb els ingressos addicionals esperats.

- **Estratègia de *swapping* múltiple:** La decisió respecte el conjunt de canvis es realitza amb una certa previsió però pot ser revisada i modificada a l'inici de cada període (setmana) abans de la sortida dels vols.

Els resultats de l'estudi suggereixen que l'aplicació de l'estratègia de *swapping* limitada dona resultats molt satisfactoris en aquells casos en què la incertesa de la demanda en aquells vols subjectes de ser re assignats és baixa i existeix un inbalanç gran entre les demandes per a cada vol. Així doncs, la qualitat dels resultats derivats de l'aplicació d'aquesta estratègia decreixen a mida que la incertesa respecte la demanda augmenta. En aquests casos, així com en casos en què hi hagi un equilibri en les demandes previstes per a cadascun dels vols subjectes de ser re assignats, la estratègia de *swapping* múltiple presenta els millors resultats.

Integrant els conceptes desenvolupats anteriorment, [Sherali et al. \(2005\)](#) proposen una metodologia de reassignació de flota, Demand Driven Refleeting (DDR), que d'una banda agrupa els avions de la flota en famílies i de l'altra, restringeix els canvis de flota a avions ja assignats (*swapping*). Una de les principals contribucions que el treball de Sherali aporta a la literatura és la investigació respecte mètodes alternatius de resolució del problema amb l'ànim de reduir el cost computacional associat. Relaxant algunes de les restriccions del problema de programació lineal, convertint un gran nombre de variables en binàries, aconsegueix solucions semi òptimes (5 % de desviació) en 20 minuts de CPU i desenvolupa una heurística (FIX) per a resoldre problemes de dimensions superiors aconseguint solucions poc degradades.

Si bé els treballs presentats anteriorment enfoquen la solució al problema de l'assignació dinàmica de capacitat (a mida que s'acosta la sortida dels vols i les previsions respecte la demanda milloren) des d'una perspectiva únicament de reassignacions de flota (és a dir, revisions del FAP), [Jiang \(2006\)](#) incorpora una metodologia absolutament innovadora i ja es refereix al problema estudiat com "Dynamic Airline Scheduling". A més de servir-se dels potencials de la reassignació de flotes, Jiang incorpora un altre tipus de modificacions sobre la programació inicial de vols: els canvis d'horari (*re-timing*). El treball demostra que el resultat combinat de l'aplicació d'aquests dos tipus de canvis poden millorar els beneficis operatius en un 2,5-5 % (18-36 M\$/any); a més, també estudia els efectes aïllats resultants de l'aplicació de cada tipus de mesura així com les sinèrgies que existeixen quan s'apliquen alhora. Una altra de les contribucions importants que el treball de Jiang aporta a les dimensions d'aquest problema és l'estudi que fa respecte les estructures de xarxa en què operen les companyies aèries i com aquestes estructures afecten als potencials de l'aplicació de la programació dinàmica de vols. D'aquesta manera, si bé reconeix que són molts els operadors que han adoptat una estructura

hub-and-spoke, aporta arguments claríssims per a que s'eviti la creació de onades d'arribada i sortida als hubs en franges molt marcades del dia (*banks*) i s'aconsegueixi distribuir el nombre d'operacions al llarg del dia (un article que aprofundeix en aquest debat es [Flint \(2002\)](#)). Amb aquest propòsit, desenvolupa (a més del model de programació dinàmica de vols) un model que permet convertir un programa de vols amb característiques de *peaked hub-and-spoke* (amb bancs d'arribades i sortida al hub) en un programa que, seguint mantenint una estructura hub-and-spoke, manté un equilibri en el nombre d'operacions al llarg del dia (*de-peaked hub-and-spoke*). Amb això, s'aconsegueix maximitzar el potencial del programa de vols inicial de cara a l'aplicació de la programació dinàmica de vols, a mesura que hi hagi una major visibilitat respecte la demanda de passatgers. Una explicació detallada respecte la construcció, justificació i experimentació d'aquest model es pot trobar a [Jiang i Barnhart \(2013\)](#).

Ja que el treball de [Jiang \(2006\)](#) resulta de gran inspiració per aquest projecte i és probablement, un dels autors que més ha aprofundit en aquest tema, es dedicarà més endavant, una secció específica per a dur a terme un anàlisi més exhaustiu de la seva investigació.

En gran part basat en el treball de Jiang, [Warburg \(2006\)](#) afegeix algunes contribucions que resulten interessants de cara al problema. D'una banda, si bé els resultats que el treball de Jiang aportava estaven basats en experiments duts a terme a partir de dades d'una gran companyia nord-americana, [Warburg \(2006\)](#) utilitza com a input dades de la companyia SAS i prediccions reals de demanda generades per sistemes de *revenue management*. Donades les grans diferències entre les característiques de l'operador sobre el qual [Jiang \(2006\)](#) basa els seus resultats i les característiques estratègiques i operatives de SAS, resulta interessant veure exemplificat el fet de la dependència existent entre el potencial de la programació dinàmica de vols i les característiques particulars de cada aerolínia. A diferència de Jiang, el treball de Warburg assoleix com a màxim, una millora en els beneficis operatius de 1,6 %. D'una altra banda, Warburg realitza un estudi respecte quines són les contribucions aïllades de la reassignació de flotes i dels canvis d'horari; en aquest sentit també observa diferències significatives amb el treball de Jiang. Mentre que els resultats del seu estudi demostren que l'efecte de només dur a terme canvis d'horari és, pràcticament insignificant, l'efecte aïllat de reassignar flotes és força més elevat. En conjunt, observa que existeixen fortes sinèrgies en l'aplicació simultània dels dos tipus de canvis; aquest fet l'atribueix a que pràcticament un terç dels vols en què s'ha canviat l'horari, també se'ls ha assignat un nou tipus de flota. Jiang, al contrari, conclou en què la contribució de només dur a terme canvis d'horari és superior a l'efecte aïllat de fer canvis de flota.

Més recentment, Yan et al. (2008) desenvolupen un model de programació de vols atenent a demandes estocàstiques (SDFSM²) en què defineixen dues heurístiques com a mètode de resolució. La seva formulació del problema és el d'un problema de programació no lineal pel que es proposen dues heurístiques per a resoldre'l (ABHA³ i RBHA⁴); aquest és un fet rellevant ja que, al millor del meu coneixement, no s'ha tractat abans aquest problema considerant-lo de naturalesa NP-hard. Per a poder formular el SDFSM, en primer lloc descriuen la xarxa de flux de flota (la forma en què es modela la rotació dels avions en un període de temps pel conjunt de nodes aeroport que conformen la xarxa de la companyia aèria), a continuació defineixen la xarxa de flux de passatgers (modela el moviment de passatgers en la xarxa de itineraris oferts per la companyia), posteriorment formulen un model de decisió de passatgers que, de forma anàloga al PMM definit anteriorment, busca assignar passatgers al programa de vols de la companyia i, finalment, construeixen un model de programació de vols amb demandes deterministes (DDFSM), que serveix de cota inferior per a la resolució del SDFSM. El SDFSM es planteja com un problema d'optimització matemàtica en què la funció objectiu busca minimitzar els costos associats al flux d'avions assignats a cada vol dins de la xarxa d'itineraris de la companyia més el cost esperat del flux de passatgers sobre la xarxa. Aquest model es formula sobre un conjunt de diferents escenaris de demanda en què es tenen es compte diferents ocurrencies estocàstiques per a la generació de cadascun d'ells.

3.2. Jiang (2006)

Per tal d'adreçar el problema objecte d'aquest projecte, es considera oportú aprofundir en un dels articles que l'han abordat amb més detall i han aportat contribucions més innovadores en la seva forma de resolució. Jiang proposa una metodologia (*Dynamic Airline Scheduling*) que realitzant reassignacions de flota (*re-fleet*) i canvis en els horaris de sortida dels vols (*re-timing*), aconsegueix millorar els beneficis operatius d'un operador aeri gràcies a un millor ajustament entre la capacitat oferta i la demanda esperada.

Com s'ha comentat anteriorment, Jiang comença realitzant un anàlisi de les estructures de xarxa que han adoptat els operadors aeris en els darrers anys. En aquest sentit, si bé reconeix que després de la liberalització als EUA les noves condicions del mercat van motivar la creació d'adoptar estructures *hub-*

² *Stochastic Demand Flight Scheduling Model*

³ *Arc-based heuristic algorithm*

⁴ *Route-based heuristic algorithm*

and-spoke, i que aquests models van afavorir connectar un major nombre de orígens i destinacions invertint, en proporció, un menor nombre de ASM⁵, sovint es van dissenyar els programes de vols de forma que es creessin bancs d'arribada i de sortida als hubs en franges horàries molt marcades del dia. En la següent figura (Fig. 3.1.) s'observa un exemple molt clar de les diferents onades d'arribada i sortida de vols en un hub; aquest és doncs, un bon exemple del que Jiang anomena *peaked hub-and-spoke*.

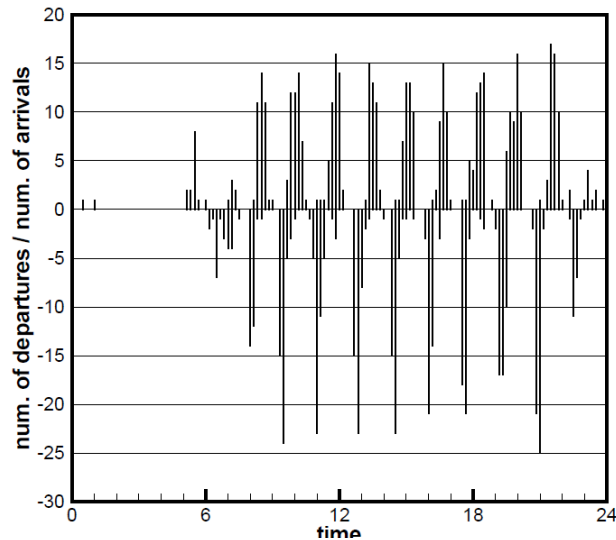


Fig. 3.1. Estructura d'un programa amb pics d'operació *peaked hub-and-spoke* (Jiang, 2006)

La creació de bancs d'arribada i de sortida de vols a un hub porta associats una sèrie de costos que resulten en ineficiències de cara a la maximització dels beneficis operatius d'una companyia aèria. Es resumeixen a continuació els principals efectes negatius associats a adoptar aquesta estructura operativa:

- La creació de pics d'activitat resulta en períodes de temps amb una alt requeriment de recursos (infraestructures aeroportuàries, personal de handling...) i altres períodes (valls entre pics) en què la necessitat de recursos és menor. Aquest fet porta associats uns efectes econòmics negatius resultant de l'ociositat de recursos.
- La creació d'onades d'arribada i sortida de vols intensifiquen els efectes de la congestió i retards en les operacions resultant en una necessitat incrementada de consum de recursos (fuel, temps, tripulacions...) i per tant, un increment en els costos d'operació.
- Reducció de la utilització (productivitat) de les aeronaus per la necessitat de coincidir en una finestra temporal comuna al hub en els vols d'arribada. Aquest fet, incrementa les escales (en

⁵ Available Seat Mile: És la mesura principal d'oferta d'una companyia aèria mesurada com el nombre de seients oferts pel nombre de milles recorregudes (l'equivalent europeu és ASK)

salts anteriors) de vols amb una etapa més curta per haver de coincidir al hub amb vols de més llarga durada.

Després dels atacs terroristes del 11/9, alguns operadors es van veure forçats a buscar alternatives en les seves estructures operatives per tal de reduir ineficiències. Va ser en aquest punt en que, mantenint la filosofia *hub-and-spoke*, es va començar a eliminar la creació de pics. Aquest fet va donar lloc a la creació del que l'autor anomena *de-peaked hub-and-spoke*. Mantenint el format il·lustratiu emprat anteriorment, a la Fig. 3.2. es mostra un exemple de quina és la forma d'aquest tipus d'operativa:

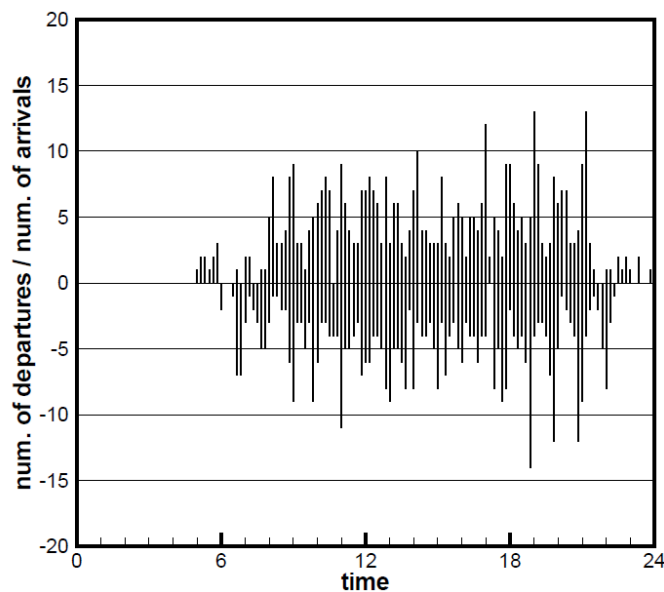


Fig.3.2. Programa *hub-and-spoke* sense pics d'operació : *de-peaked* (Jiang, 2006)

Com s'aprecia en la figura anterior, una operació *de-peaked hub-and-spoke*, si bé conserva els beneficis de la operativa *hub-and-spoke*, dispersa l'arribada i sortida dels vols als hubs, eliminant els efectes econòmics negatius associats i ja expressats anteriorment. Així doncs, l'adopció d'aquest tipus d'estructura redueix la necessitat de recursos als hubs (per una reducció de l'activitat compresa en un període acotat de temps), minimitza els efectes de les congestions per regulacions, meteorologia..., creant programes de vols més robustos i incrementa la utilització de les aeronaus possibilitant la reducció dels temps d'escala per no haver d'esperar a passatgers en connexió.

A efectes del propòsit d'aquest projecte, el major potencial derivat de l'adopció d'una estructura *de-peaked hub-and-spoke*, consisteix, no obstant, en una major oportunitat per a oferir connexions entre vols; és a dir, aquest tipus d'operativa, maximitza la connectivitat entre salts i possibilita la captació de tràfic d'un major nombre de mercats sense una inversió específica per a fer-ho. Si bé en una estructura en què la creació de bancs d'arribada i sortida de conjunts de vols ha estat dissenyada per a oferir un determinat nombre de connexions entre salts (exactament igual al nombre de combinacions possibles

entre vols d'arribada i sortida), en una estructura *de-peaked*, petits ajustaments en els temps d'arribada i de sortida dels vols als hubs, poden resultar en un increment o reducció del conjunt de itineraris que es poden oferir en connexió (via el hub). A més, aquests ajustaments dels temps d'arribada i sortida de les operacions (*re-timing*), també tenen un efecte sobre les oportunitats que hi pot haver per a realitzar reassignacions de flota (*re-fleetting*). Així doncs, es considera que el fet d'adoptar una estructura *de-peaked hub-and-spoke* maximitza el potencial de l'aplicació de la programació dinàmica de vols.

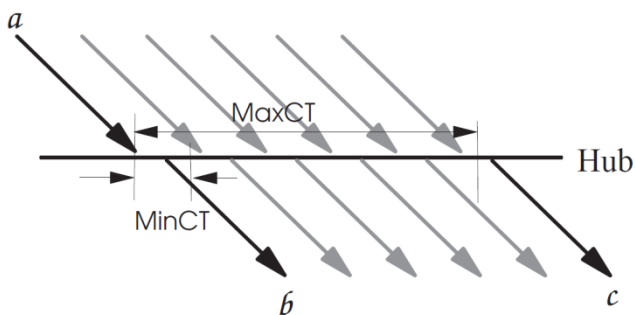


Fig.3.3. Programa de vols original (Jiang, 2006)

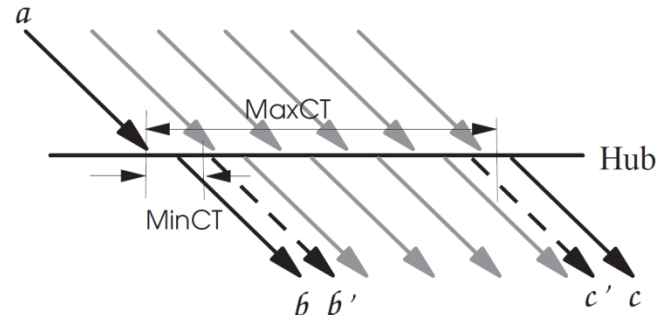


Fig.3.4. Alteracions en els horaris d'arribada i sortida (Jiang, 2006)

En les il·lustracions anteriors s'exemplifica com, partint d'una programació inicial (Fig. 3), si es realitzen petites alteracions en els instants de sortida dels vols *b* i *c* (s'atraça la sortida del vol *b* (*b'*) i s'avança la sortida del vol *c* (*c'*), s'aconsegueix augmentar el conjunt d'itineraris en connexió que es poden oferir des de l'origen del vol *a*; això és perquè hi ha un major nombre de sortides en l'interval de temps en què els passatgers provinents del vol *a* poden connectar a altres vols (interval (MinCT, MaxCT)). De la mateixa manera, si s'observen les figures Fig. 3.5 i Fig. 3.6, si s'avança l'arribada del vol *b* i s'atraça la sortida del vol *c*, en el cas que el vol *c*, inicialment servit per un avió A319 (amb menor capacitat que un A320), tingués una previsió de demanda superior a la seva capacitat i el vol *d*, inicialment servit per un A320, tingués una previsió que resultaria en seients buits, es podrien reassignar flotes (realitzar un *swap*) per a millorar l'ajustament de capacitat.

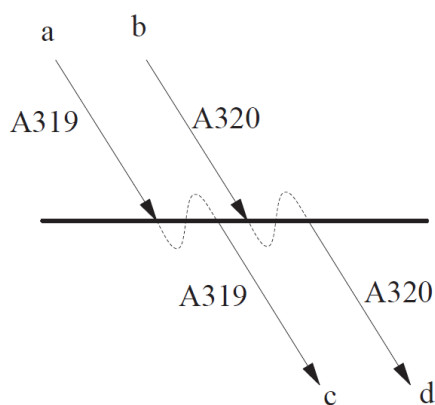


Fig.3.5. Assignació inicial de flotes (Jiang, 2006)

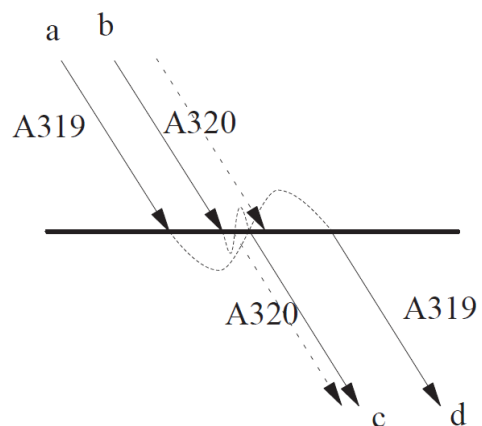


Fig.3.6. Reassignació de flotes (Jiang, 2006)

Jiang aplica la metodologia de la programació dinàmica de vols sobre els programes originals generats per a cada dia; això comporta que, després de l'aplicació dels canvis associats a aquesta metodologia, els programes generats són independents els uns dels altres (són diferents per a cada dia). El procés general en què consisteix l'aplicació d'aquesta metodologia es descriu a continuació:

1. Per a cada programa original (programació de vols per a una data concreta), es fixen x punts de re optimització al llarg del seu període de comercialització (període (α, ω)).
2. En cada punt de re optimització x_i es realitzen les següents accions:
 - a. Prenent com a inputs, d'una banda el programa original, les reserves realitzades en el període (α, x_i) i la demanda de passatgers esperada per al dia ω en l'instant x_{i-1} (última previsió de demanda), s'executa el Passenger Mix Model (PMM), per tal d'assignar els passatgers a cadascun dels vols que conformen el programa de vols original.
El resultat del PMM genera, d'una banda, el conjunt d'itineraris en connexió reservats en el període (α, x_i) i d'una altra banda, el conjunt de seients ocupats en cada vol. Aquests dos conjunts de dades serviran per a imposar restriccions a l'hora de pertorbar el programa de vols original: els itineraris en connexió reservats impediran canviar horaris de vols que trenquessin la connexió (fora del període $(\text{MinCT}, \text{MaxCT})$) i el conjunt de seients ocupats suportarà valorar el potencial de realitzar cada canvi.
 - b. Partint de la programació de vols original es calcula, per a cada família d'aeronaus, el nombre d'avions que pernocten a cada aeroport. Aquest càlcul imposarà la restricció de balanç d'avions en cada estació de cara a l'aplicació de pertorbacions sobre la programació inicial de vols.
 - c. Prenent com a inputs la previsió actualitzada de demanda a l'instant x_i , el nombre d'avions que pernocten en cada aeroport (base), el conjunt d'itineraris en connexió en què hi ha seients reservats i el nombre de seients reservats en cada vol, s'executa el model de programació dinàmica de vols (DAS) que genera alteracions en els horaris dels vols i realitza reassignacions de flota, generant un programa de vols reoptimitzat.
 - d. Prenent com a dades d'entrada el programa generat al pas anterior, el nombre de seients ocupats per a cada vol i la previsió actualitzada de demanda a l'instant x_i , es torna a executar el PMM per tal d'assignar els passatgers al nou programa de vols.
 - e. Es calculen els beneficis operatius derivats del programa de vols generat en el pas anterior, tenint en compte les previsions de demanda actualitzades.

El següent diagrama (Fig. 3.7) mostra de forma esquemàtica el funcionament de la programació dinàmica de vols descrita anteriorment.

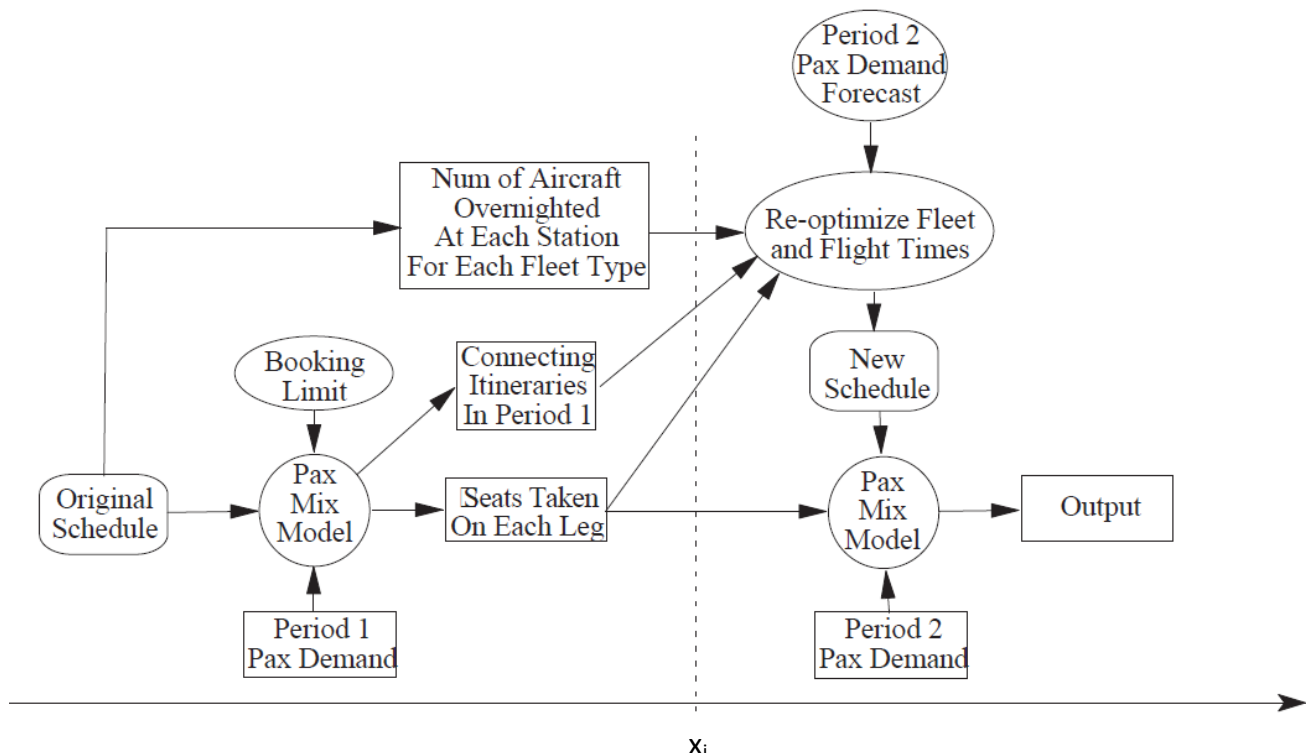


Fig.3.7. Diagrama de flux metodologia DAS (Jiang, 2006)

Com s'ha descrit anteriorment, l'autor fa ús principalment, de dos models d'optimització matemàtica diferents: d'una banda utilitza el PMM per tal d'assignar el conjunt de passatgers esperats en cada mercat a la oferta particular de la companyia aèria i de l'altra el DAS per tal de realitzar els canvis de *re-fleeting* i *re-timing* que maximitzin el valor de la funció objectiu. Per a un detall dels models matemàtics emprats en el treball de Jiang (PMM i DAS), es poden consultar a l'Annex d'aquest projecte.

Pel que fa als experiments duts a terme a l'article, Jiang posa a prova la metodologia desenvolupada prenent com a input dades d'una companyia aèria nord-americana que opera un programa de vols en una estructura *peaked-hub-and-spoke*. Així doncs, com s'ha explicat anteriorment, primerament s'aplica un model que, creant còpies dels vols originals desfasant-los 10 minuts en un interval de (-30 min,+30 min) aconseguix generar un programa sense ones d'arribada i sortida de vols al hub (*de-peaked hub-and-spoke*) que es prendrà com a punt de partida per a l'aplicació del PMM i el DAS; una explicació detallada d'aquest model es pot trobar a Jiang i Barnhart (2013). D'aquesta manera, pel que fa a les característiques del programa de vols inicials (ja "*de-peaked*"), es tracta d'un conjunt d'uns 600 vols diaris a/desde un únic hub, amb 7 tipus diferents d'avió pertanyents a 2 famílies de flota.

Per tal de dur a terme els experiments, tal i com s'ha exposat amb anterioritat, més enllà de comptar amb les característiques del programa de vols inicials, l'altre dada important és la previsió actualitzada de demanda disponible en el moment de l'aplicació d'aquesta metodologia. Per a dotar de major realisme els resultats derivats, Jiang aplica el seu model sobre dos escenaris de demanda diferents: un en què se suposa un realisme absolut en les prediccions (el pronòstic és 100% encertat) i un altre en què es prenen valors mitjans de dades històriques. D'aquesta manera, aconseguir definir els llindars (superior i inferior respectivament) de l'interval en que se situen els valors resultants de l'aplicació dels models.

Després d'executar els models d'optimització sobre el conjunt de dades presentades anteriorment, es resumeixen en la següent taula (Fig. 3.8) els resultats derivats per a cadascun dels dies de la setmana i sota cadascun dels escenaris de demanda esperats. Com es pot observar, en el millor dels casos ("Forecast A") s'assoleix un increment dels beneficis operatius promig del 5,26 % (99.541 \$ addicionals/dia) respecte l'escenari estàtic (en què no s'ha aplicat cap canvi sobre el programa de vols). Aquest increment s'aconsegueix amb un augment del 1,33 % dels ingressos i pràcticament sense cap variació sobre els costos. En l'escenari menys optimista, l'increment és d'un 2,64 % dels beneficis diaris gràcies a un increment promig dels ingressos del 0,71 %.

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7	Average
Static								
Revenue	9,058,867	8,018,606	6,870,656	7,363,064	7,946,805	8,333,631	7,176,026	7,823,951
Cost	5,929,789	5,929,789	5,929,789	5,929,789	5,929,789	5,929,789	5,929,789	5,929,789
Profit	3,129,079	2,088,817	940,868	1,433,276	2,017,016	2,403,842	1,246,238	1,894,162
Dynamic scheduling under Forecast A								
Revenue	9,217,867	8,136,941	6,934,930	7,446,343	8,037,549	8,457,232	7,263,078	7,927,706
	1.76%	1.48%	0.94%	1.13%	1.14%	1.48%	1.21%	1.33%
Cost	5,952,668	5,941,897	5,922,260	5,919,607	5,931,148	5,937,127	5,933,309	5,934,002
	0.39%	0.20%	-0.13%	-0.17%	0.02%	0.12%	0.06%	0.07%
Profit	3,265,199	2,195,045	1,012,670	1,526,736	2,106,401	2,520,105	1,329,769	1,993,704
	4.35%	5.09%	7.63%	6.52%	4.43%	4.84%	6.70%	5.26%
Profit incr.	136,120	106,227	71,803	93,461	89,385	116,263	83,531	99,541
Dynamic scheduling under Forecast B								
Revenue	9,138,582	8,053,907	6,903,108	7,399,164	7,991,578	8,403,273	7,269,020	7,879,805
	0.88%	0.44%	0.47%	0.49%	0.56%	0.84%	1.30%	0.71%
Cost	5,929,631	5,923,936	5,916,015	5,936,996	5,934,338	5,935,877	5,972,766	5,935,651
	0.00%	-0.10%	-0.23%	0.12%	0.08%	0.10%	0.72%	0.10%
Profit	3,208,952	2,129,972	987,094	1,462,168	2,057,239	2,467,397	1,296,254	1,944,154
	2.55%	1.97%	4.91%	2.02%	1.99%	2.64%	4.01%	2.64%
Profit incr.	79,873	41,154	46,226	28,893	40,223	63,554	50,016	49,991

Fig.3.8. Taula de resultats utilitzant la metodologia DAS (Jiang, 2006)

Més enllà d'aquests resultats, l'autor també realitza un estudi respecte quines són les contribucions aïllades i conjuntes de dur a terme els canvis en l'assignació de flotes i els canvis d'horari. Es resumeixen en la següent taula (Fig. 3.9), els resultats obtinguts:

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7	Average
Static								
Revenue	9,058,867	8,018,606	6,870,656	7,363,064	7,946,805	8,333,631	7,176,026	7,823,951
Cost	5,929,789	5,929,789	5,929,789	5,929,789	5,929,789	5,929,789	5,929,789	5,929,789
Profit	3,129,079	2,088,817	940,868	1,433,276	2,017,016	2,403,842	1,246,238	1,894,162
Dynamic scheduling								
Revenue	9,217,867	8,136,941	6,934,930	7,446,343	8,037,549	8,457,232	7,263,078	7,927,706
	1.76%	1.48%	0.94%	1.13%	1.14%	1.48%	1.21%	1.33%
Cost	5,952,668	5,941,897	5,922,260	5,919,607	5,931,148	5,937,127	5,933,309	5,934,002
	0.39%	0.20%	-0.13%	-0.17%	0.02%	0.12%	0.06%	0.07%
Profit	3,265,199	2,195,045	1,012,670	1,526,736	2,106,401	2,520,105	1,329,769	1,993,704
	4.35%	5.09%	7.63%	6.52%	4.43%	4.84%	6.70%	5.26%
Profit incr.	136,120	106,227	71,803	93,461	89,385	116,263	83,531	99,541
Re-fleeting only								
Revenue	9,109,981	8,056,714	6,879,294	7,392,490	7,971,557	8,365,499	7,213,944	7,855,640
	0.56%	0.48%	0.13%	0.40%	0.31%	0.38%	0.53%	0.41%
Cost	5,940,955	5,934,028	5,925,018	5,932,752	5,931,862	5,927,903	5,941,608	5,933,447
	0.19%	0.07%	-0.08%	0.05%	0.03%	-0.03%	0.20%	0.06%
Profit	3,169,027	2,122,686	954,275	1,459,737	2,039,695	2,437,596	1,272,336	1,922,193
	1.28%	1.62%	1.43%	1.85%	1.12%	1.40%	2.09%	1.48%
Profit incr.	39,948	33,869	13,408	26,462	22,679	33,754	26,098	28,031
Re-timing only								
Revenue	9,116,276	8,065,954	6,912,824	7,413,155	7,973,981	8,375,223	7,219,623	7,868,148
	0.63%	0.59%	0.61%	0.68%	0.34%	0.50%	0.61%	0.56%
Cost	5,929,731	5,929,673	5,929,673	5,929,673	5,929,789	5,929,673	5,929,615	5,929,689
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Profit	3,186,545	2,136,281	983,151	1,483,483	2,044,192	2,445,551	1,290,008	1,938,459
	1.84%	2.27%	4.49%	3.50%	1.35%	1.74%	3.51%	2.34%
Profit incr.	57,466	47,464	42,284	50,207	27,176	41,709	43,770	44,297

Fig.3.9. Taula de resultats comparatius entre *re-timing* i *re-fleeting* (Jiang, 2006)

Com es pot observar en la figura anterior, per a tots els dies de la setmana, l'efecte de només fer canvis en els horaris del vols aporta una millora superior a l'increment dels beneficis que no pas l'aplicació aïllada dels canvis de flota. En el primer cas, en promig s'assoleix un augment de 2,34 % sobre els beneficis; en canvi, en el segon cas, la contribució es troba 0,86 pp per sota. No obstant, s'observa que la contribució conjunta de dur a terme els dos tipus de canvi de forma simultània és més que proporcional a la suma dels increments aïllats ($5,26\% > 3,82\%$); aquest fet indica que existeixen sinèrgies positives en l'aplicació conjunta del *re-timing* i del *re-fleeting*.

Pel que fa al cost computacional associat a la generació d'aquests resultats, Jiang executa els models proposats (codificats en C) utilitzant el solucionador ILOG CPLEX 9.0 sobre un computador equipat amb un processador Intel Pentium 4 de 2,8 GHz i 1 GB de RAM. Com s'observa en la següent figura, provant els models sobre dos conjunts de dades diferents, es triga entre 10 i 20 h en obtenir una solució.

	Instance A	Instance B
Num. of rows	16,731	21,262
Num. of columns	389,689	767,763
Num. of nonzeros	1,108,637	2,242,589
Num. of nodes searched	7,250	3,250
Solution time (hours)	10	20
Optimality gap	1.88%	2.34%

Fig.3.10. Costos computacionals associats a la generació de resultats (Jiang, 2006)

SECCIÓ 3 – METODOLOGIA DE RESOLUCIÓ: ALGORITME DACRA

4. Descripció detallada del problema i presentació de la metodologia de resolució proposada

4.1. Introducció

Comptant amb la base teòrica i la revisió respecte diverses metodologies de resolució que permeten haver adquirit una visió detallada alhora que plurifacètica entorn al problema a tractar, es presenta en aquesta secció de la memòria, la que es considera la principal contribució original d'aquest projecte: el disseny, desenvolupament, implementació, execució i validació d'un algoritme que aporta una alternativa de resolució al problema tractat. Per a fer-ho, es fa una descripció dels diferents elements que componen la metodologia desenvolupada a l'hora que s'assoleix una major comprensió del problema abordat.

L'algoritme DACRA (*Dynamic Airline Capacity Reassignment*) s'ha dissenyat i concebut com una meta heurística que combinant petits canvis sobre els horaris de sortida dels vols (*re-timing*) i realitzant intercanvis en l'assignació inicial de flotes (*re-fleetings*), generi solucions pseudo-òptimes que permetin maximitzar el valor de la funció objectiu (beneficis totals), sent capaços de generar un major volum d'ingressos degut a un millor ajustament de la capacitat, a mida que s'acosta la data de sortida dels vols i es disposa d'actualitzacions cada cop més fiables respecte la previsió de passatgers; tot això, preservant la condició de que la solució generada sigui operativament factible.

Si bé com ja s'ha advertit anteriorment, les perspectives d'enfocament d'aquesta metodologia es basen en el treball de Jiang, la metodologia de resolució és al millor del meu coneixement, totalment innovadora: a diferència de la metodologia DAS desenvolupada a Jiang (2006), el problema no es tracta com un exercici d'optimització exacta, pel qual l'objectiu no és cercar una solució òptima sinó trobar una solució "prou bona" (que no s'allunyi massa de l'òptim) en un temps de còmput reduït. L'adopció d'aquesta alternativa de resolució es basa, d'una banda, en la voluntat d'aportar una metodologia innovadora a l'hora que eficaç i de l'altra, en la sèrie d'avantatges que aporta respecte el plantejament desenvolupat per Jiang i que més endavant s'expressen.

Amb la voluntat de criticar la metodologia que a continuació es detallarà, hom podria pensar que no es justifica el disseny d'una heurística si ja existeixen mètodes exactes que aporten solucions òptimes al problema. Si bé aquest és un plantejament raonable, només és cert de forma parcial; l'obtenció d'una solució òptima al problema de la programació dinàmica de vols només és possible si es fixen una sèrie de limitacions que restringeixin el creixement exponencial del seu arbre de solucions. És per aquest motiu, que l'algoritme DACRA s'ha dissenyat com una meta heurística que explora l'arbre d'abastament

cercant solucions pròximes a l'òptim, inclús en escenaris en què aquest problema pugui ser de naturalesa *NP-hard*.

Per a fer-ho, es basa el procés de cerca de solucions en un mètode iteratiu que guiat per un criteri d'èxit, executa canvis sobre el programa de vols i re calcula, després de cada pertorbació, el valor de la funció objectiu; prenent de base aquella solució que hagi estat la millor fins al moment, aquest procés s'aplica de forma iterativa de forma que el valor de la funció objectiu millora amb el pas del temps situant-se cada cop més a prop de l'òptim. A aquesta estratègia d'exploració de l'espai de solucions, s'introdueixen elements pseudo-aleatoris que permeten diversificar l'elecció respecte la branca de progressió en cada node, possibilitant l'exploració d'una major àrea de l'espai de solucions i generant, d'aquesta manera, un major nombre d'alternatives de solució possibilitant-ne la valoració qualitativa, més enllà de la quantitativa, de cara al *decision maker*.

4.2. Inputs

Per tal de dur a terme la metodologia proposada i com ja s'ha detallat amb anterioritat, són necessaris principalment, dos grups de dades: d'una banda cal disposar del programa de vols per a una data concreta sobre el qual es vol executar l'algoritme DACRA i de l'altra, son necessàries les previsions (*forecast*) respecte la demanda de passatgers prevista per a cada vol així com l'ingrés mig previst per passatger. A més també serà necessari, per tal de calcular el valor de la funció objectiu, disposar del conjunt de dades relatives als costos tant operatius (costos variables) com fixos per a cada ruta i tipus de flota. Es descriuen a continuació aquestes dades i s'aporten exemples per a un major detall i claredat:

1. **Programa de vols (*flight schedule*):** Inclou el conjunt de vols a operar, els horaris (sovint en UTC⁶), i el tipus d'avió assignat a cada vol. De forma gràfica, el programa de vols per a una data concreta es representa com un conjunt de rotacions; és a dir, un conjunt de seqüències ordenades de salts (*legs*) assignats a cada avió disponible a la flota. Per tant, és necessària informació respecte:

- a. **Aeroports:** Per a cada aeroport cal conèixer, a més del seu identificador únic (codi IATA/OACI), el seu temps mínim d'escala (MTT) i l'interval d'arribada. El temps mínim

⁶ Universal Time Coordinated: Format d'hora internacional

d'escala indica el temps mínim amb el qual, donades les característiques operatives, de infraestructura i mitjans de cada aeroport, és possible realitzar les operacions de handling necessàries per a assistir l'escala d'un vol. Aquesta dada fixa doncs, la cota mínima respecte l'escala que haurà de realitzar tot avió que aterri en cada aeroport. L'interval d'arribada, d'altra banda, consisteix en el període de temps que limita el mercat definit per a cada vol i està associat a cada aeroport; s'aclarirà aquest concepte en el següent punt (4.3.) d'aquesta memòria. Un exemple d'aquest tipus de dades podria ser el que es presenta a continuació:

AIRPORTS		
IATA code	Min TT	Arrival Interval
BCN	25	40
PMI	30	40
FCO	30	15
EAS	25	40
IBZ	25	40
MAD	30	15
ORY	30	15
ZRH	30	15

Fig.4.1. Exemple d'inputs per als aeroports

b. Flota: Aquest conjunt de dades inclou tota la informació relativa als avions de la flota assignats per operar cadascuna de les rotacions que conformen els vols programats. D'una banda, cal disposar d'un identificador únic (matrícula) que pot no ser definitiu (ja que com s'ha exposat en el punt 2.4., la matriculació és un procés que es duu a terme amb força poca antelació depenent de la disponibilitat d'aparells). A més també cal conèixer la capacitat (nombre de seients disponibles per a la comercialització) de cada avió així com la família de flota a la qual pertanyen (cada família està integrada per varis tipus d'avió) i el tipus d'avió del qual es tracta (model); també serà necessari conèixer en quin aeroport estan basats.

FLEET				
Reg.	Seating Capacity	Fleet Family	Fleet Type	Base
IPI	131	A320	A318	BCN
HRP	180	A320	A320	BCN
JKD	180	A320	A320	MAD
LBX	144	A320	A319	ORY
JNM	144	A320	A319	ORY

Fig.4.2. Exemple d'inputs per a la flota

c. Vols (*legs*): Cada vol es defineix com un enllaç directe entre un aeroport d'origen i de destí en unes hores de sortida i arribada determinades. Per aquest motiu, serà necessari per a reunir aquestes dades conèixer, per a cada vol: l'identificador únic del vol (codi alfanumèric), els codis referents als aeroports de sortida i arribada del vol, la hora programada de sortida (STD: *Scheduled Departure Time*), la hora programada d'arribada (STA: *Scheduled Arrival Time*), l'avió assignat a aquell vol (matrícula), la previsió respecte la demanda de passatgers prevista per a aquell vol així com la previsió de l'ingrés mig per tarifa per passatger.

FLIGHTS							
Flight Num	Orig	Dest	STD	STA	Assigned Aircraft	Fcstd PAX	Fcstd Avg Fare
KR1432	BCN	PMI	700	745	HRP	127	53
KR1433	PMI	BCN	820	905	HRP	114	83
KR1434	BCN	FCO	0950	1135	HRP	165	97
KR1435	FCO	BCN	1225	1410	HRP	197	86
KR1436	BCN	EAS	635	745	IPI	178	78
KR1437	EAS	BCN	815	925	IPI	187	126
KR1438	BCN	IBZ	1000	1055	IPI	127	56
KR1439	IBZ	BCN	1125	1220	IPI	187	62
KR1440	MAD	ORY	720	920	JKD	191	112
KR1441	ORY	FCO	1005	1155	JKD	231	157
KR1442	FCO	ORY	1230	1420	JKD	154	107
KR1443	ORY	BCN	725	905	LBX	131	86
KR1444	BCN	ORY	945	1125	LBX	139	106
KR1445	ORY	ZRH	1205	1320	LBX	125	164
KR1446	ZRH	ORY	1355	1510	LBX	129	184

Fig.4.3. Exemple d'inputs per als vols

2. Previsions: Com s'ha destacat de forma reiterada al llarg d'aquesta memòria, resulta fonamental disposar de dades referents a la previsió, a una determinada antelació de la sortida dels vols, de la demanda de passatgers prevista per a cada vol (i per tant, mercat), així com l'ingrés mig que s'espera que cada passatger aporti. És d'importància remarcar que la previsió respecte la demanda de passatgers no és un valor subjecte a la capacitat (nombre de seients) disponible en cada vol; de fet, el que buscarà l'algoritme és poder ajustar aquesta capacitat a la previsió de demanda per a generar un major volum d'ingressos i poder millorar els beneficis potencials. S'entén doncs per demanda prevista de passatgers, l'estimació respecte el conjunt d'individus que ocuparan un seient que desitgen viatjar entre un determinat aeroport d'origen i destí, arribant a la destinació en un determinat interval de temps (l'amplitud del qual dependrà de les característiques de mercat de l'aeroport en qüestió) sota uns factors de qualitat determinats (dependents de les característiques de servei de l'operador aeri en qüestió). A efectes de una major simplificació en la programació de

l'algoritme, s'ha partit de la hipòtesi que tots els passatgers que desitgen viatjar entre un origen i un destí amb una arribada en un determinat període de temps, estan disposats, si no hi ha places en un vol directe, a viatjar en connexió (amb una escala). D'altra banda, també és necessari conèixer una previsió de l'ingrés mig per passatger; aquest valor inclou el valor de la tarifa mitjana així com tots els ingressos indirectes (*ancillary revenues*) que es preveu que els passatgers del vol aportaran. Evidentment, obtenir aquestes dades no és una tasca gens fàcil i és per aquest motiu que en aquest projecte no se n'han explicat les seves formes de generació. Dins d'una companyia aèria, sol ser l'equip de gestió d'ingressos (Revenue Management), l'encarregat de generar aquestes previsions a través d'elaborats models i sistemes basats en anàlisi d'històrics i regressions; aquest no és, no obstant, l'objecte d'aquest projecte i es per això que s'assumeix que aquestes dades estan disponibles.

3. Costos: Un altre grup de dades fonamentals consisteix en el conjunt de costos associats a la operació del programa de vols sobre el qual s'aplica l'algoritme. D'una banda, caldrà conèixer els costos variables (operatius) de cada ruta, per a cada tipus (model) d'aeronau que pertanyi al conjunt d'avions assignats als vols que conformen el programa. Aquests costos inclouen aspectes com el consum de combustible, el sou de les tripulacions, el handling, els serveis de neteja i càtering, les taxes aeroportuàries i de navegació aèria... en definitiva, tots aquells costos en els quals s'incorre al realitzar un vol i que estan, per tant, directament vinculats al tipus d'aeronau assignada al vol en qüestió. D'altra banda, caldrà conèixer els costos imputats a cada vol referents a partides com els arrendaments i amortitzacions d'oficines, hangars i flota, els sous del personal d'oficines, les despeses energètiques generals... Tots aquests són costos fixos que si bé no depenen del tipus d'aeronau assignada a cada vol, sí que comptablement se n'assigna una proporció a cada vol; així doncs, caldrà conèixer els costos fixos per ruta, independentment del tipus d'avió assignat a cada vol. A més, independentment dels costos anteriors, també caldrà conèixer quins són els costos associats a poder oferir una connexió (vol amb escala): aquests són els costos referents al handling necessari per a descarregar, traslladar i carregar els equipatges d'aquells passatgers que viatgin en connexió d'un avió a un altre.

A320			A319			A318		
RUTA	CV	CF	RUTA	CV	CF	RUTA	CV	CF
BCNPMI	5.250,00 €	1.125,00 €	BCNPMI	3.937,50 €	1.125,00 €	BCNPMI	3.346,88 €	1.125,00 €
PMIBCN	5.250,00 €	1.125,00 €	PMIBCN	3.937,50 €	1.125,00 €	PMIBCN	3.346,88 €	1.125,00 €
BCNFCO	12.250,00 €	2.625,00 €	BCNFCO	9.187,50 €	2.625,00 €	BCNFCO	7.809,38 €	2.625,00 €
FCOBCN	12.250,00 €	2.625,00 €	FCOBCN	9.187,50 €	2.625,00 €	FCOBCN	7.809,38 €	2.625,00 €
BCNEAS	8.750,00 €	1.875,00 €	BCNEAS	6.562,50 €	1.875,00 €	BCNEAS	5.578,13 €	1.875,00 €
EASBCN	8.750,00 €	1.875,00 €	EASBCN	6.562,50 €	1.875,00 €	EASBCN	5.578,13 €	1.875,00 €
BCNIBZ	6.416,67 €	1.375,00 €	BCNIBZ	4.812,50 €	1.375,00 €	BCNIBZ	4.090,63 €	1.375,00 €
IBZBCN	6.416,67 €	1.375,00 €	IBZBCN	4.812,50 €	1.375,00 €	IBZBCN	4.090,63 €	1.375,00 €
MADORY	14.000,00 €	3.000,00 €	MADORY	10.500,00 €	3.000,00 €	MADORY	8.925,00 €	3.000,00 €
ORYFCO	12.833,33 €	2.750,00 €	ORYFCO	9.625,00 €	2.750,00 €	ORYFCO	8.181,25 €	2.750,00 €
FCOORY	12.833,33 €	2.750,00 €	FCOORY	9.625,00 €	2.750,00 €	FCOORY	8.181,25 €	2.750,00 €
ORYBCN	11.666,67 €	2.500,00 €	ORYBCN	8.750,00 €	2.500,00 €	ORYBCN	7.437,50 €	2.500,00 €
BCNORY	11.666,67 €	2.500,00 €	BCNORY	8.750,00 €	2.500,00 €	BCNORY	7.437,50 €	2.500,00 €
ORYZRH	8.750,00 €	1.875,00 €	ORYZRH	6.562,50 €	1.875,00 €	ORYZRH	5.578,13 €	1.875,00 €
ZRHORY	8.750,00 €	1.875,00 €	ZRHORY	6.562,50 €	1.875,00 €	ZRHORY	5.578,13 €	1.875,00 €

Fig.4.4. Exemple d'inputs per als costos

Així doncs, de cara a l'aplicació de l'algoritme DACRA es partirà de la base de que totes aquestes dades estan disponibles en un determinat instant de temps constituent, en conjunt, els inputs necessaris per a executar l'algoritme. De forma gràfica, es pot representar aquest conjunt de dades al diagrama que es mostra al següent diagrama (Fig. 4.5) (*flight schedule*):

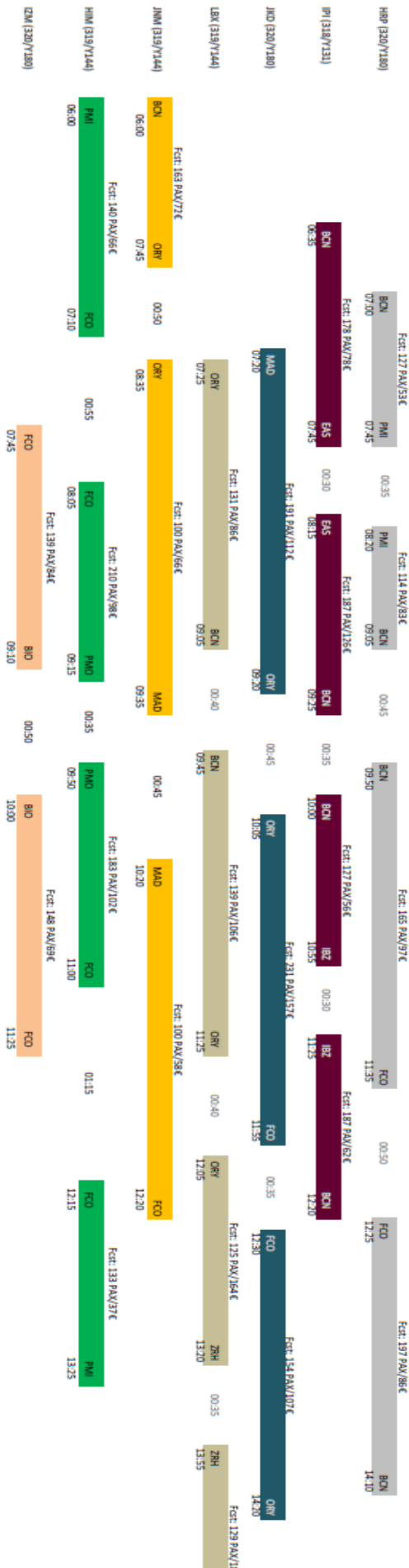


Fig.4.5. Exemple del programa de vols per a una data concreta (Flight Schedule)

4.3. Mercats

Un concepte fonamental de cara al desenvolupament i comprensió de la metodologia proposada és el de “mercat”. Un mercat es pot definir, bàsicament, com un enllaç entre un origen i un destí en una hora d’arribada a la destinació, dins d’un determinat període de temps; l’amplitud d’aquest període ve determinada per les característiques particulars d’aquell mercat. Així doncs, es considera que per exemple, en el mercat Barcelona (BCN) – Venècia (VCE) hi participarien tots aquells vols que servissin aquests dos punts en un període d’arribada a VCE de ± 45 min entorn a l’horari d’arribada d’un vol de referència; en canvi, en un mercat com el Barcelona (BCN) – París (ORY), el període podria ser (depenent de la franja del dia) de ± 15 min. Aquest fet es deu a l’elasticitat-horari de la demanda de cada mercat; en el primer cas, la majoria del tràfic sol ser de lleure pel qual l’horari d’arribada no sol ser un factor determinant de la demanda; en el segon cas, en canvi, es tracta d’un mercat amb un gran volum de passatgers de negoci pels quals l’horari d’arribada és un factor crític de cara a seleccionar la oferta d’una companyia o d’una altra.

D’aquesta manera, tot mercat pot estar servit per un o més vols que uneixin aquests dos punts arribant a la destinació dins del període d’arribada que defineix al mercat. Els vols continguts ens un mercat (*legs*) poden servir-lo de forma directa o en connexió (a través del hub, o hubs, que defineix la xarxa de rutes de l’aerolínia). Vegem a continuació (Fig. 4.6), un exemple per a esclarir aquest concepte:

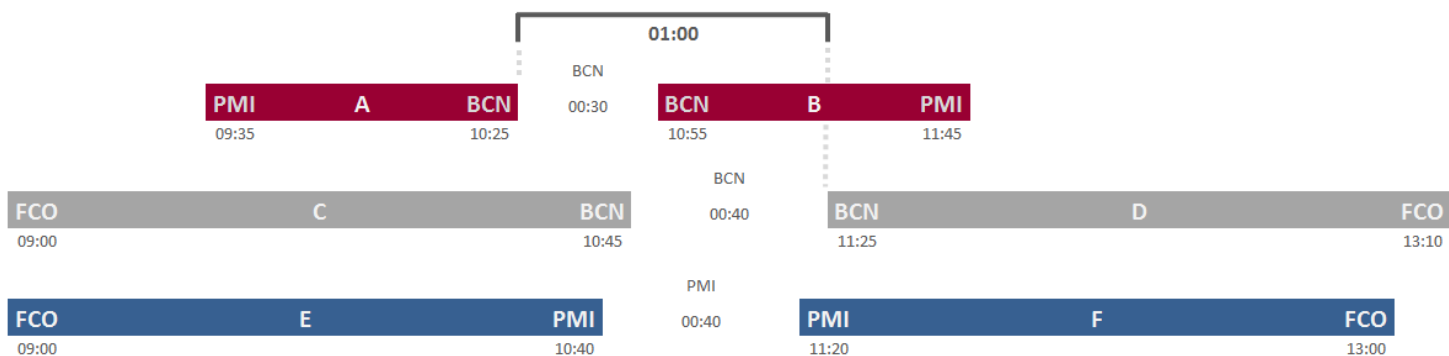


Fig.4.6. Visualització de vols que constitueixen un mercat dins del programa

Considerant els vols de l’anterior Fig 4.6 dins de la programació de vols d’una companyia aèria determinada, en una data concreta, podem definir com a mercat la connexió entre Palma de Mallorca (PMI) i Roma (FCO) amb arribada a FCO en el període (12:45,13:15); és a dir, prenent com a referència el vol F i considerant un interval de ± 15 min. En aquest cas, aquest mercat estaria servit pels vols F, A i D. En el primer cas, el vol és directe mentre que en el segon i tercer cas el vol és en connexió a través

del hub BCN definint l'itinerari PMI-BCN-FCO (vols A i D). Per a que aquesta connexió sigui factible, caldrà que es respectin tant les escales mínimes establertes en cada aeroport (*Min Tournaround Time*) com el temps mínim de connexió (*MinCT*) necessari per a la logística d'equipatges d'un vol a l'altre i també el temps màxim de connexió (*MaxCT*) que la companyia aèria hagi definit. En aquest cas, si el temps mínim de connexió necessari per la companyia fos de 55 min, seria factible la connexió entre els vols A i D (hi ha una hora de diferència entre l'arribada del vol A i la sortida del vol D).

Partint de la programació de vols per a una data concreta, es considera que cada vol (*leg*) defineix un mercat sobre el qual s'hi afegeixen tots aquells itineraris que el poden servir de forma directa o bé en connexió, a través d'una altre aeroport, sempre i quan es respectin les restriccions de temps esmentades anteriorment. Així doncs, és possible que un mateix vol participi en varis mercats al mateix temps.

4.4. Definició de la funció objectiu

La definició de la funció objectiu resulta un element fonamental de cara a dissenyar una metodologia que sigui mesurable d'acord amb el potencial real que aporta i que constitueixi una base sòlida de referència de cara a realitzar comparacions entre solucions i poder derivar el conjunt de conclusions que recolzin i potenciïn la difusió de la pràctica desenvolupada.

En aquest cas en particular, d'altra banda, s'ha buscat una definició pròxima a la que Jiang (2006) proposa en el seu article de cara a fer comparables els resultats que s'obtinguin i poder derivar conclusions reals respecte la qualitat de les solucions que la heurística proposada generi; un altre cop, d'aquesta manera s'aconsegueix disposar d'un punt de referència extern respecte del qual relativitzar les contribucions de la metodologia desenvolupada i poder-la executar sobre les mateixes instàncies per tal d'observar-ne les desviacions i la qualitat relativa de les solucions .

Vegem a continuació la formulació matemàtica de la funció objectiu:

$$\max. \sum_{m \in M} \sum_{r \in R(m)} x_{mr} fare_m^F - \sum_{l \in L(M)} \sum_{\pi \in \Pi(M)} c_{l\pi} - \sum_{l \in L(M)} \sum_{\pi \in \Pi(M)} z_{l\pi} - \sum_{l \in L(M)} n_l Y$$

On :

M: Conjunt de mercats.

$R(m)$: Conjunt d'itineraris⁷ que serveixen al mercat $m \in M$.

x_{mr} : Nombre de passatgers assignats a algun itinerari $r \in R$ del mercat $m \in M$.

$fare_m^F$: Tarifa mitja prevista pel mercat $m \in M$.

$L(M)$: Conjunt de vols (*legs*) que serveixen al conjunt de mercats M .

$\Pi(M)$: Conjunt de tipus de flota que serveixen el conjunt de mercats M .

$c_{l\pi}$: Cost operatiu (variable) derivat d'assignar un avió de tipus π al vol l .

$z_{l\pi}$: Cost fix derivat d'assignar un avió de tipus π al vol l .

$$n_l: \begin{cases} - 0 \text{ si el vol } l \text{ serveix al mercat } m \text{ sense connexió (és un vol directe).} \\ - \lambda \text{ u.m si el vol } l \text{ serveix al mercat } m \text{ amb connexió (no és un vol directe) entre} \\ \text{l'origen i el destí que defineixen el mercat .} \end{cases}$$

Y : Cost derivat del handling necessari per a possibilitar la connexió entre dos vols; és el cost de connexió.

Com és fàcilment deduïble a partir de la formulació anterior, es defineix com a criteri de quantificació i discriminació de les solucions, els beneficis totals previstos que es generin amb la configuració del programa de vols que s'avaluï en cada instant en que es calculi la funció objectiu. D'aquesta manera, la funció recull d'una banda els ingressos totals generats per l'activitat del transport aeri (producte entre la previsió de passatgers total i la tarifa mitja del bitllet) i de l'altra, els costos totals (tant fixos com variables) derivats de l'assignació de cada tipus d'avió a cada vol més els costos de connexió (en aquells mercats en que hi hagi itineraris que el serveixin en connexió).

Per tal de maximitzar el valor d'aquesta funció, l'algoritme DACRA buscarà millorar l'ajustament entre la previsió de la demanda de passatgers per a cada mercat i la capacitat total disponible (nombre de seients) en aquell mercat; és a dir, intentarà minimitzar les desviacions entre la oferta disponible i la demanda prevista (minimització dels costos d'*spill* i *spoil*). Per a fer-ho, d'una banda s'avaluaran canvis d'horari per tal de incloure més seients en connexió en aquells mercats en que es prevegi una mancança de capacitat i es buscaran, d'altra banda, oportunitats per a re assignar el tipus de flota en vols en què hi hagi una previsió de seients buits així com en vols en que es pronostiqui una major demanda a la oferta disponible.

⁷ S'entén per itinerari un enllaç entre un aeroport d'origen i de destí. Per tant, un itinerari pot estar format per un o més vols (*legs*) depenent de si hi ha o no connexió (vol amb escala)

4.5. Tipus de canvis

Per tal de maximitzar el valor de la funció objectiu descrita anteriorment i tal i com s'ha expressat en prèvies ocasions, l'algoritme executarà petits canvis sobre el programa de vols base que rebi com a input. En aquest apartat es descriuen amb més detall en què consisteixen aquestes pertorbacions, quins elements hi intervenen, quines restriccions existeixen i de quina manera són capaços de maximitzar el valor de la funció objectiu. Per a garantir una bona comprensió i facilitar-ne la visualització, s'acompanyen les explicacions d'exemples basats en els inputs mostrats anteriorment.

Es contemplen dos tipus de canvis diferents: canvis en els horaris del vols i reassignacions en el tipus de flota assignada a cada vol.

4.5.1. Canvis en els horaris dels vols (*retiming*)

Tenint present la definició de mercat donada anteriorment, realitzar canvis en els horaris de sortida dels vols podrà ser útil en aquells mercats en els quals hi hagi una escassetat de seients disponibles; mercats pels quals la previsió de passatgers demandant el servei de transport entre dos aeroports, arribant a la destinació en un interval determinat de temps, supera el nombre de seients disponibles en el mercat: suma de seients "lliures" (nombre de seients disponibles per a la comercialització) de tots els avions que serveixen als vols que pertanyen a aquell mercat. Si tot mercat ve determinat per un vol d'origen i altres vols que el serveixen de forma directa o bé en connexió, realitzar alteracions sobre els horaris de sortida de determinats vols pot possibilitar la generació de noves connexions factibles així com la inclusió de vols directes que no es trobaven en el mercat perquè estaven fora de dels límits marcats per l'interval d'arribada de l'aeroport de destí; d'aquesta manera és possible, mitjançant la realització de canvis d'horari, incloure nous vols al mercat en qüestió incrementant-ne la oferta de seients disponibles i possibilitant per tant, una major generació d'ingressos potencials al reduir el nivell de *spill* (passatgers desatesos). Si bé és cert que la inclusió d'una major quantitat de seients en mercats amb escassetat de capacitat resulta sempre en una major generació d'ingressos potencials, en els casos en què els moviments d'horaris es realitzin en motiu de possibilitar una connexió entre dos vols, cal tenir en compte el cost associat al handling necessari per a possibilitar aquesta connexió; per tant, no és prudent afirmar que la realització de canvis d'horaris que possibilitin augmentar el nombre de seients disponibles en un mercat sempre resulta en una major generació de beneficis potencials. Considerem per exemple, un cas en el qual el cost de possibilitar una connexió entre dos vols fos de 200 € i la tarifa mitja del primer vol fos de 50 € i la del segon de 34 €; si només hi haguessin 2 seients disponibles en els

vols a connectar (el màxim entre els seients disponibles en un i altre vol fos de 2), els costos de 200 € superarien els 168 € addicionals generats per la inclusió de 2 seients addicionals al mercat, resultant en una reducció dels beneficis potencials; en aquest cas, per tant, l'alteració en els horaris de sortida dels vols no resultaria en una contribució positiva.

Havent ja definit quin és el sentit de realitzar aquest tipus de canvis i coneixent de quina manera possibiliten maximitzar el valor de la funció objectiu, es descriuen a continuació el conjunt de restriccions que afecten el moviment de vols així com els factors determinants de cara a decidir l'amplitud dels moviments:

(1) El moviments d'horari (minuts) seran sempre valors múltiples de 5: Aquest és un requisit essencial ja que és en franges de 5 minuts com es gestiona la capacitat de moviments als aeroports i s'assignen les operacions tant d'arribada com de sortida; són els anomenats slots aeroportuaris. És important remarcar en referència als slots aeroportuaris, que els moviments proposats per l'algoritme DACRA no contemplen la disponibilitat dels nous slots sol·licitats. No obstant i en benefici d'aquells canvis que comportin un moviment de 5 minuts partint d'hora múltiple de 10 (per exemple de les 09:10 a les 09:15), aquest tipus de moviment en alguns aeroports no suposa un canvi de slot pel qual la disponibilitat n'està garantida.

(2) L'amplitud dels moviments estarà restringida a l'interval entorn del qual s'hagi determinat el període d'arribada del mercat que defineix cada vol: Ja que tot vol defineix un mercat i cada mercat té com a característica l'arribada al destí en un període determinat de temps entorn a l'hora d'arribada del vol, depenent de la elasticitat-horari de la demanda per a aquell mercat, un vol no podrà moure's més enllà dels límits (tant superior com inferior) que delimitin el període d'arribada del mercat que defineix; és a dir, un vol no podrà mai abandonar el mercat que ell mateix defineix.

(3) Caldrà sempre garantir que es compleixen els temps d'escala mínims fixats per a cada aeroport: Ja que cada aeroport porta associat un temps mínim d'escala (MTT), caldrà garantir que tot canvi d'horari no violi el temps mínim d'escala de l'aeroport de sortida ni d'arribada. Una altra forma de descriure aquesta restricció consistiria en dir que només seran possibles canvis d'horari en aquells vols que tinguin programada, en algun dels dos aeroports que visita, una escala superior al temps mínim d'escala (MTT) fixat per aquell aeroport; és a dir, que tot canvi d'horari serà possible si existeix un "buffer" de temps en algun dels aeroports.

(4) Encara que aquesta no és una restricció que afecta directament als canvis d'horari, sí que és absolutament imprescindible per a garantir una de les principals finalitats de realitzar moviments d'horari: crear connexions factibles entre vols. Així doncs, per a que sigui possible la connexió entre dos vols, a part de la condició evident de localització física (la sortida d'un vol s'ha de produir des del mateix aeroport que l'arribada del vol amb el qual es desitja connectar), caldrà que la distància en temps entre l'arribada d'un vol i la sortida del vol al qual es vol connectar, sigui igual o superior al temps mínim de connexió necessari per a la companyia aèria per a realitzar el conjunt d'activitats de handling associades a una connexió (MinCT). De forma anàloga, caldrà que aquesta distància sigui igual o inferior al temps màxim de connexió que per motius de qualitat la companyia hagi fixat (MaxCT).

Per tal d'il·lustrar amb un exemple en què poden consistir aquests tipus de canvis, a la següent Fig. 4.7 es presenta un cas en el qual es realitzen ajustaments d'horaris per tal d'incrementar el valor de la funció objectiu preservant una solució operativament factible.

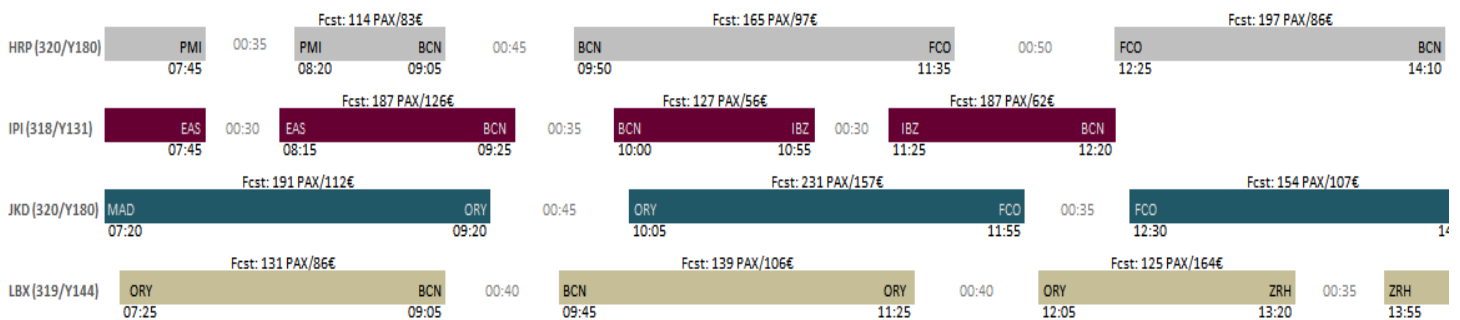


Fig.4.7. Fracció del programa de vols amb oportunitats per a realitzar moviment d'horaris

Si s'observa amb atenció un fragment del que podria ser el programa de vols d'una companyia determinada per a una data concreta, s'identifica una oportunitat per a realitzar un canvi d'horari i possibilitar la generació d'un major volum de beneficis. Així doncs, si prenem el vol ORY-FCO (KR1441) de les 10:05 assignat a l'avió JKD (Airbus A320) amb una capacitat de 180 seients, s'observa que la previsió de passatgers per a aquest vol és de 231 amb una tarifa mitja prevista per passatger de 157 €. En aquest cas, ja que l'interval d'arribada al mercat ve determinat per l'aeroport d'arribada, i FCO, com s'observa en la taula d'inputs mostrats, té un període d'arribada de ± 15 min, el mercat definit pel vol en qüestió (KR1441) comprèn tots aquells itineraris (vols únics o parelles de vols) que permetin la sortida des de ORY i l'arribada a FCO a una hora compresa entre les 11:40 i les 12:10 ($11:55 \pm 15$ min): en aquest cas, l'únic vol que comprèn aquestes restriccions és el ja considerat KR1441 sent l'únic vol del seu mercat. Ja que aquest és un mercat amb escassetat de seients ($231 > 180$) es pot valorar el *spill* de

51 (231-180) passatgers en un cost d'oportunitat que equival a una pèrdua d'ingressos potencials de 8007 € ($51 \text{ pax} \times 157 \text{ €}$). Per tal de reduir el nivell de passatgers desatesos i incrementar el volum d'ingressos potencials, es podria realitzar un canvi d'horari sobre el vol BCN-FCO de les 09:50 (KR1434) assignat a l'avió HRP de 180 places, consistent en retardar-ne la sortida fins a les 10:00; és a dir, moure'l 10 minuts. D'aquesta manera, s'aconseguiria que aquest vol arribés a FCO a les 11:45, amb la qual cosa entraria al mercat en qüestió (estaria dins de l'interval d'arribada (11:40, 12:10)) i possibilitaria una connexió amb el vol ORY-BCN de les 07:25 (KR1443) assignat a l'avió LBX de 144 places, ja que compliria amb la restricció descrita anteriorment referent als temps mínims i màxims d'escala: en aquest cas, l'escala seria de 55 min (09:05-10:00). A més, el moviment d'horari del vol KR1434 també compliria amb la resta de restriccions ja que respectaria el temps mínim d'escala amb el següent vol FCO-BCN de les 12:25; el moviment faria reduir l'escala a FCO de 50 (12:25-11:35) a 40 (12:25-11:45) minuts però tot i així seria superior al temps d'escala mínim (MTT) fixat a l'aeroport de FCO que és, com s'ha mostrat a l'exemple d'inputs donat, de 30 minuts. Amb tot, aquest canvi d'horari respectaria totes les restriccions descrites i possibilitaria d'aquesta manera que els vols KR1443 i KR1434 s'incorporessin al mercat FCO-ORY de les 11:40-12:10 generat pel vol KR1441, formant l'itinerari en connexió ORY-BCN-FCO (07:25-09:05 → 10:00-11:45). La contribució d'aquest canvi consistiria en la inclusió de 13 seients addicionals en el mercat (mínim entre la quantitat de seients lliures en un i altre vol que componen la connexió: $144-131 < 180-165$), la qual cosa reduiria el nivell de *spill* a 38 passatgers i possibilitaria un increment d'ingressos de 2379 € equivalent a la suma dels ingressos mitjos de cadascun dels vols que formen la connexió pel nombre de passatgers que s'ha aconseguit acomodar ($2379 = 13 (86+97)$). No obstant, a aquest canvi d'horari caldria afegir-li el cost de connexió; suposant que és de 200 €, el canvi portaria associat un increment de 2.179 € sobre el valor de la funció objectiu (beneficis totals).

4.5.2. Canvis en el tipus d'avió assignat a cada vol (*refleeting*)

Si com ja s'ha comentat amb anterioritat, a priori és raonable pensar que es pot maximitzar el valor de la funció objectiu (beneficis totals) a través d'un millor ajustament de la capacitat oferta a la demanda prevista, resulta molt lògic ajustar la oferta de seients disponible en cada mercat a la demanda de passatgers esperada per a cadascun dels mercats. Aquest és doncs, l'objectiu principal de realitzar canvis en els tipus d'avions assignats a cada vol: aconseguir que el nombre de seients disponibles en cada mercat s'ajusti al màxim a la demanda de passatgers prevista per a aquell mercat, possibilitant una major captació d'ingressos al reduir els nivells de *spill* (nombre de passatgers desatesos) i *spoil* (nombre

de seients buits). D'aquesta manera, es buscaran oportunitats per a realitzar intercanvis de flota que resultin en un benefici global; per exemple, assignant un avió de menor capacitat a un mercat en què la previsió de passatgers sigui baixa i assignant avions de major capacitat a vols amb una major predicció de passatgers. Tot i que aquest és el criteri genèric que es pren com a referència a l'hora de guiar els canvis en les assignacions de flota, hi pot haver casos en què, no seguint-lo, es pugui millorar el valor de la solució inicial; és per aquest motiu que l'algoritme DACRA té llibertat per a provar tots aquells canvis de flota que resultin operativament factibles. Un exemple d'aquest fet es podria observar en el cas en què es volgués intercanviar un vol amb una previsió de passatgers de 187 assignat a un avió de 180 places per un avió de 200 places assignat a un vol amb 190 passatgers: si bé aquest intercanvi suposaria un pitjor ajustament global de la capacitat, ja que es passaria d'un nivell de *spill* global de 7 passatgers a 10 passatgers, en el cas que l'ingrés previst per passatger del primer vol fos, per exemple de 200 € i l'ingrés per passatger del segon fos de 130 €, el canvi portaria associat un increment dels ingressos totals de 100 €. Cal remarcar, no obstant, que la generació d'un major volum d'ingressos no es tradueix de forma directa en una millora dels beneficis globals (funció objectiu); això es deu a que els canvis en les assignacions de flota impliquen canvis en els costos operatius (CV) associats a cada vol. És per aquest motiu que és necessari disposar, com s'ha mostrat en l'explicació dels inputs, dels costos operatius associats a cada ruta i tipus d'avió.

De la mateixa manera que els canvis en els horaris dels vols, els canvis en l'assignació de flota també porten una sèrie de restriccions associades que en limiten la seva aplicació, sempre garantint que els canvis executats siguin operativament factibles. Es descriuen tot seguit aquest conjunt de restriccions:

(1) Només seran possibles intercanvis de flota entre avions que pertanyin a la mateixa família:

Aquesta resulta una condició fonamental de cara a garantir que els intercanvis de flota siguin compatibles amb les tripulacions assignades a cada vol: com bé s'apunta en varies de les fonts bibliogràfiques consultades i descrites en l'apartat de revisió bibliogràfica, són molts els autors que han incorporat aquesta restricció en articles en què es proposen reassignacions de flota; ja que les certificacions de les tripulacions (tant auxiliars com tècniques) estan vinculades a una família de flota determinada, l'intercanvi entre avions de diferent tipus (model) però igual família, no altera el resultat de l'activitat de planificació i assignació de tripulacions a vols (*crew rostering*). D'aquesta manera, una tripulació que per exemple, hagués estat assignada per a operar un vol BCN-ARN en un avió A320 de 180 places, també ho podrà fer si es canvia el tipus d'avió per un A319 de 144 places, ja que ambdós aparells són de la mateixa família.

(2) Caldrà que es respecti la coincidència en temps i espai per a poder dur a terme el creuament de flotes: Encara que resulti evident, cal deixar constància de que l'intercanvi entre

els tipus d'avions assignats a dos o més vols, només serà possible si hi ha una coincidència tant temporal com geogràfica (aeroport) per a poder dur a terme el creuament. Aquesta restricció preserva que les rotacions programades per a cada avió no es vegin alterades més enllà d'aquells vols sobre els quals s'estigui realitzant la reassignació de flota. És per aquest motiu que resultarà molt més senzill trobar oportunitats per a realitzar intercanvis de flota entre parelles de vols en què l'aeroport de sortida del primer vol coincideixi amb el d'arribada del segon vol que no pas canvis de vols individuals, ja que en aquest últim cas, els dos vols a intercanviar haurien de servir la mateixa ruta.

(3) En tot cas, els canvis de flota hauran de respectar els temps mínims d'escala fixats per a cada aeroport (MTT): Ja que la realització d'un canvi en l'assignació d'un avió a un determinat vol comporta un canvi en la rotació d'aquell avió (ja que deixa d'operar un vol per a operar-ne un altre amb diferents característiques: ruta, horari...), és molt possible que variïn les escales anteriors i posteriors al vol subjecte de ser canviat. Per tant, a l'hora d'avaluar una oportunitat per a realitzar un canvi en l'assignació de flotes, caldrà assegurar que després del canvi es mantindran unes escales, tant abans com després del vol (si n'hi ha) iguals o superiors als temps mínims d'escala associats a cadascun dels aeroports.

Es considera oportú en referència a la restricció (2), indicar que l'algoritme desenvolupat s'ha dissenyat de manera que possibiliti l'intercanvi de flotes entre vols individuals així com entre parelles de vols. D'aquesta manera, s'aconsegueix incrementar molt notablement el nombre d'oportunitats de cara a l'aplicació d'aquest tipus de canvis al no restringir que cada vol individual hagi de servir la mateixa ruta que aquell amb el qual es vulgui dur a terme l'intercanvi. D'altra banda, és encertat observar que en el cas de vols individuals les oportunitats són menors ja que això implicaria que una companyia operés les mateixes rutes en horaris molt similars; aquest és amb tot, un escenari poc desitjable des del punt de vista estratègic i comercial d'un operador aeri.

De la mateixa manera que s'ha fet en l'explicació dels canvis d'horari, prenent com a base els inputs ja presentats, es presenta en la [Fig. 4.8](#) un exemple que pot afavorir una millor comprensió d'aquest tipus de canvis així com la il·lustració del conjunt de restriccions presentades anteriorment:

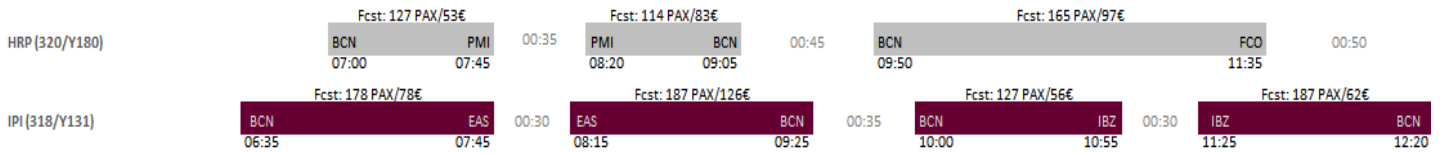


Fig.4.8. Fracció del programa de vols amb oportunitats per a realitzar intercanvis de flota

Si s'observa amb atenció la fracció del programa de vols anterior, s'identifica una oportunitat per a realitzar un ajustament de capacitat mitjançant un intercanvi de flotes entre les parelles de vols BCN-PMI/PMI-BCN (parella 1) i BCN-EAS/EAS-BCN (parella 2). La parella 1, assignada a l'avió HRP (A320) de 180 places, té una previsió de 127 i 114 passatgers respectivament amb uns ingressos mitjos previstos de 53 € i 83€; la parella 2 assignada a un avió A318 de 131 places, d'altra banda, té una previsió de passatgers de 178 i 187 respectivament amb uns ingressos mitjos previstos de 78€ i 126€. En aquest escenari inicial, hi ha un total de 103 passatgers desatesos (no hi ha prou seients buits en els vols en què desitgen volar) i els ingressos totals associats a aquests quatre vols són de 42.917 €. Tenint present el conjunt de restriccions descrites, l'intercanvi de flotes entre les parelles de vols 1 i 2 és possible ja que d'una banda, l'intercanvi es produeix entre avions de la mateixa família (A320 i A318), tant l'inici com el final d'ambdós itineraris es produeix al mateix aeroport (BCN) i l'intercanvi no viola els temps mínims (MTT) de les escales programades per als següents vols de les rotacions programades per a cadascun dels avions: en el cas de l'avió HRP, l'escala a BCN després del vol BCN-EAS seria de 25 min (de 09:25 a 09:50) i per a l'avió IPI, després del vol PMI-BCN, l'escala seria de 55 min (de 09:05 a 10:00); en aquest cas, no és necessari verificar aquesta restricció per a les escales anteriors als vols ja que les dues parelles de vols es troben a l'inici de les rotacions dels seus avions assignats. Sabent que aquest és un canvi factible, després de la nova assignació de flotes als vols considerats, l'ajustament de capacitat hauria millorat fins al punt de reduir fins a 7 els passatgers desatesos (l'únic vol en què mancava capacitat seria el EAS-BCN) i els ingressos totals s'haurien incrementat en 9.840 € gràcies a la venda de 96 bitllets addicionals assolint un total d'ingressos de 52.757 €.

5. Implementació i explicació de l'algoritme

Havent ja presentat i explicat de forma genèrica quina és l'aproximació proposada en aquest projecte de cara a resoldre el problema descrit i comptant d'altra banda, amb una descripció clara dels diferents elements que hi intervenen, en aquesta secció s'explica de forma detallada en què consisteix l'algoritme DACRA i de quina forma s'ha constituït. Per a fer-ho es presentaran fragment del pseudocodi que, en aquest cas, ha estat implementat en el llenguatge de programació Java i s'acompanyarà d'explicacions que en suportin la seva comprensió.

L'algoritme DACRA s'ha fonamentat en una estructura de cerca iterativa que partint d'una solució inicial (formada pel conjunt d'inputs necessaris ja presentats en la secció anterior), realitza alteracions (canvis d'horari i canvis en l'assignació de flotes) i recalcula, després de cada pertorbació, el valor de la funció objectiu. Prenent com a base la millor solució obtinguda fins al moment, l'algoritme va "escalant" en l'espai de solucions cercant aquelles instàncies de la solució inicial que permetin maximitzar el valor de la funció objectiu. En aquest sentit, l'enfocament ha estat de millora continua (*greedy*) ja que mai es dóna crèdit per a prendre una solució que porti associat un pitjor valor de la funció objectiu com a base per a realitzar canvis amb l'esperança que pugui portar a majors millores (escapi d'un màxim local). Aquesta estructura, de la forma que ha estat implementada, es presenta tot seguit en forma de pseudocodi:

Fig.5.1. Pseudocodi de l'estructura general de l'algoritme DACRA

```

procedure DACRA (inputs)
(1) bestSol ← generateInitialSol (inputs)
(2) while termination criterion is not met do
(3)   newSol ← bestSol
(4)   spillMarket ← selectSpillMarket (newSol)
(5)   spoilMarket ← selectSpoilMarket (newSol)
(6)   executeRetiming (spillMarket)
(7)   executeRefleeting (spoilMarket)
(8)   if executeRetiming is true or executeRefleeting is true
       then
(9)       regenerateMarkets (newSol)
(10)      reassignPassengers (newSol)
(11)      recalcFlightBuffers (newSol)
(12)      recalcObjFunction (newSol)
(13)      if profit (newSol) > profit (bestSol) then
(14)          bestSol ← newSol
(15)      end if
(16)   end if
(17) end while
end procedure

```

En primer lloc, es genera la solució inicial a partir del conjunt d'inputs i se'n calcula el valor de la funció objectiu: aquesta constitueix la base de partida de l'algoritme DACRA de cara a la generació de canvis i millora de la funció objectiu. Com que de moment és la millor solució que es té, s'emmagatzema a la variable **bestSol** (1). A partir d'aquesta solució, es dona inici al procediment iteratiu de cara a millorar-ne el valor de la funció objectiu associada ja prèviament descrita (beneficis totals); per aquest motiu, es realitza una còpia de la solució base (**bestSol**) a la variable **newSol**, sobre la qual s'executaran els canvis.

De cara a generar pertorbacions que millorin el valor de la funció objectiu, cal definir un criteri que possibiliti cercar oportunitats per a realitzar canvis d'horari i reassignacions de flota de forma assertiva però que a l'hora, no limiti l'exploració d'altres àrees de l'espai de solucions. És per aquest motiu que s'han definit els mètodes **selectSpillMarket** (4) i **selectSpoilMarket** (5) que retornen, en el primer cas, un mercat entorn el qual aplicar un canvi d'horaris i en el segon, un mercat sobre el qual executar intercanvis en l'assignació de flotes. El mètode **selectSpillMarket** pren el conjunt de mercats de la solució **newSol** i els ordena de més a menys *spill*, situant al capdavant de la llista aquells mercats pels quals la demanda de passatgers supera amb més quantitat el nombre de seients disponibles en aquell mercat; tot seguit, es fa ús d'una distribució geomètrica que retorna un índex que fa referència a un element de la llista (mercat) sobre el qual s'intentarà aplicar un canvi d'horari. D'aquesta manera, s'aconsegueix assignar una major probabilitat per a que el mercat escollit sigui un mercat amb una alta necessitat de seients; no obstant, aquest fet no limita a que en algunes ocasions el mercat seleccionat sigui qualsevol altre element de la llista, possibilitant l'exploració d'altres camins en l'arbre d'estats. De forma anàloga a aquest procediment, el mètode **selectSpoilMarket** fa el mateix però amb la llista ordenada de més a menys *spoil*, situant al capdavant de la llista aquells mercats amb més seients buits; d'aquesta manera, amb una major probabilitat, el mercat retornat serà un mercat en el qual, a través d'assignar un avió de menor capacitat al seu vol d'origen, s'aconsegueixi un millor ajustament de la capacitat. Un cop obtinguts aquests mercats de referència, s'inicia el procés de cerca d'oportunitats per a la realització de canvis. Començant pels canvis d'horari i a partir del mercat seleccionat i emmagatzemat a la variable **spillMarket**, s'inicia el procés (6) que a continuació es detalla en forma de pseudocodi (Fig. 5.2):

```

procedure executeRetiming (spillMarket)

(1) sourceLeg  $\leftarrow$  getMarketSourceLeg (spillMarket)
(2) for each leg2 arriving at sourceLeg destination airport do
(3)   if leg2 is not already contained in spillMarket then
(4)     if leg2 STA < spillMarket LB and leg2 postBuff >= distance
        to spillMarket LB or leg2 STA > spillMarket UB and leg2
        preBuff >= distance to spillMarket UB then
(5)       if leg2 origin airport is different from sourceLeg
        origin airport then
(6)         for each leg1 arriving to leg2 departing airport
        and departing from sourceLeg origin airport do
(7)           if checkConnection (leg1, leg2) is true
            then
(8)             add connection to candidateConnections
(9)           end if
(10)        end for
(11)       else
            add connection to candidateConnections
(12)       end if
(13)     end if
(14)   end for
(15) selectedCandidate  $\leftarrow$  maxFreeSeatsCandidate (candidateConnections)
(16) executeSwap (selectedCandidate)
end procedure
    
```

Fig.5.2. Pseudocodi del procediment definit per a la cerca i execució de canvis en els horaris dels vols

Ja que tot mercat es genera a partir d'un vol de referència que en determina l'aeroport d'origen, l'aeroport de destí, l'interval d'arribada al destí (STA del vol \pm el temps "arrival interval" determinat per l'aeroport de destí) i la demanda prevista de passatgers, es pren com a referència el vol que dóna origen al mercat seleccionat emmagatzemant-lo a la variable **sourceLeg** (1). A continuació, per tal d'intentar incloure una major quantitat de seients al mercat en qüestió, cal buscar vols que no estiguin ja presents en el mercat (3) i compleixen el conjunt de restriccions necessàries per a entrar-hi. En primer lloc, com resulta evident, cal que els vols candidats **leg2** arribin al mateix aeroport que el vol de referència **source Leg** (2); de tot aquest conjunt de vols, se'n poden derivar dos escenaris (4):

1. Que el vol en qüestió no estigui dins del mercat ja que la seva hora d'arribada a l'aeroport de destí és més tard que la hora màxima d'arribada permesa per a ser inclòs en el mercat: En aquest cas, serà possible que el vol entri al mercat si el marge de moviment cap a l'esquerra (**leg2** PreBuff: marge de moviment cap a l'esquerra sense violar la restricció d'escala mínima al seu aeroport d'origen) és

suficient per a situar-lo dins de l'interval d'arribada que fixa el mercat, sense que abandoni el seu propi mercat (el mercat que ell mateix defineix). És el cas que s'il·lustra a la següent Fig 5.3:

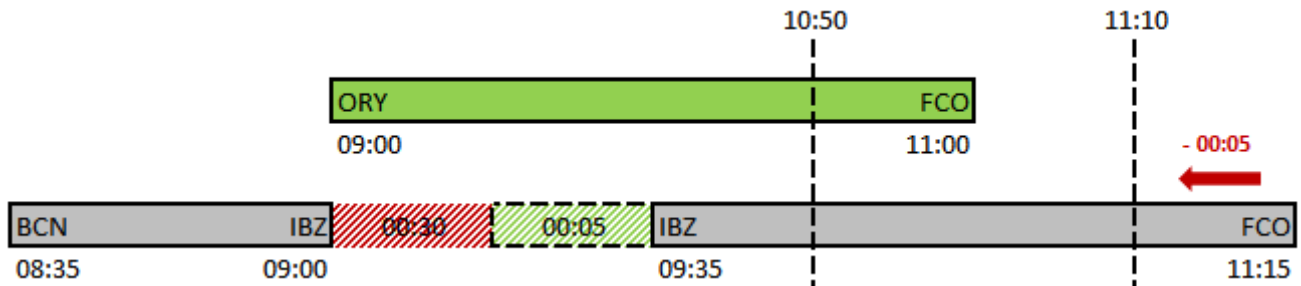


Fig.5.3. Possible escenari de cara a l'aplicació de canvis en els horaris dels vols

2. Que el vol en qüestió no estigui dins del mercat ja que la seva hora d'arribada a l'aeroport de destí és més d'hora que la hora mínima d'arribada permesa per a ser inclòs en el mercat: En aquest cas, serà possible que el vol entri al mercat si el marge de moviment cap a la dreta (leg2 PostBuff: marge de moviment cap a la dreta sense violar la restricció d'escala mínima al seu aeroport de destí) és suficient per a situar-lo dins de l'interval d'arribada que fixa el mercat, sense que abandoni el seu propi mercat.

Un cop s'han obtingut el conjunt de vols que compleixen les condicions anteriors, cal observar-ne el seu aeroport d'origen: si l'aeroport d'origen no coincideix amb el del mercat (5), caldrà buscar un altre vol que, sortint de l'aeroport d'origen del mercat i respectant totes les restriccions que garanteixen que una connexió sigui factible, puguin oferir un itinerari en connexió per tal de servir al mercat en qüestió (7); d'altra banda, si l'origen del vol coincideix amb el del mercat, es tracta d'un vol directe que ja compleix amb el conjunt de restriccions necessàries per a ser inclòs al mercat i per tant, passa a ser un candidat per a executar-ne el canvi d'horari que li escaigui (11). El mètode **checkConnection** (Fig. 5.4) comprova si és factible la connexió entre dos vols contemplant-ne tots els casos possibles en quant a la distribució de vols candidats.

```

procedure checkConnection (leg1, leg2)

(1) if leg1 postBuff >= leg1 distance to connection LB or leg1 preBuff >=
distance to connection UB
(2) or leg1 distance to connection UB <= leg2 remaining postBuff
(3) or leg1 distance to connection LB <= leg2 remaining preBuff then
(4)         return true
(5) else if
(6)         return false
end procedure
    
```

Fig.5.4. Pseudocodi per al procediment de validació de restriccions en el cas de vols en connexió

Amb tot, arribat aquest punt, ja es disposa d'un conjunt de vols, bé siguin directes o en connexió, que compleixen amb el conjunt de restriccions necessàries per a que, realitzant algun canvi en els seus horaris, puguin passar a servir el mercat en qüestió. D'aquest conjunt de vols emmagatzemats a la variable **candidateConnections**, cal seleccionar-ne un o una parella, en el cas dels vols en connexió, sobre els quals s'aplicaran les modificacions en els horaris. El criteri d'elecció emprat es basa en elegir aquell candidat que ofereixi un nombre més gran de seients buits; d'aquesta manera, s'aconsegueix maximitzar l'impacte del canvi sobre el valor de la funció objectiu. En el cas dels vols en connexió, el nombre de seients lliures a la connexió coincideix amb el mínim entre el nombre de seients lliures al primer tram i el nombre de seients lliures al segon tram de l'itinerari.

Pel que fa als intercanvis en l'assignació de flotes, es presenta a continuació (Fig. 5.5) els pseudocodi que fa referència al procediment emprat per a cercar i executar aquest tipus de perturbacions:

```

procedure executeRefleeting (spoilMarket)
(1) srcLeg ← getMarketSourceLeg (spoilMarket)
(2) for each posibleLeg departing from the srcLeg departing airport do
(3) if the aircraft assigned to posibleLeg has a different seating
    capacity to that one assigned to srcLeg and both aircrafts belong to
    the same fleet family then
(4)     if posibleLeg has a previous flight then
(5)         if checkConstraintMTT (posPrev, srcLeg, srcAirport) is
            true and (srcLeg doesn't have a previous flight or
            checkConstraintMTT (srcPrev, posibleLeg, srcAirport) is
            true) then
(6)             if posibleLeg doesn't have a next flight then
(7)                 if srcLeg and posibleLeg arrive at the same
                    airport and ( srcLeg doesn't have a next flight
                    or checkConstraintMTT (posibleLeg, srcNext,
                    destAirport) is true then
(8)                     addSwapCandidates (srcLeg, posibleLeg)
(9)                 else if
                    addCandidatePair (posPrev, posibleLeg)
(10)            else if
(11)                if checkConstraintMTT (srcLeg, posNext,
                    destAirport) is true and (srcLeg doesn't have
                    next flight or checkConstraintMTT (posibleLeg,
                    srcNext, destAirport) is true then
(12)                    if srcLeg and posibleLeg arrive at the
                        same airport then
(13)                        addSwapCandidates (srcLeg, posibleLeg)
(14)                    else if

```

```

(15)                                addCandidatePair(posPrev, posibleLeg)
(16)                                addCandidatePair(posNext, posibleLeg)
(17)                                end if
(18)                                end if
(19)    else if
(20)        if posibleLeg doesn't have a next flight then
(21)            if srcLeg and posibleLeg arrive at the same airport
                then
(22)                if (srcLeg doesn't have a previous flight or
                    checkConstraintMTT (srcPrev, posibleLeg,
                    srcAirport) is true) and (srcLeg doesn't have a
                    next flight or checkConstraintMTT (posibleLeg,
                    srcNext, destAirport) is true) then
(23)                    addSwapCandidates (srcLeg, posibleLeg)
(24)                end if
(25)            end if
(25)        else if
(26)            if (checkConstraintMTT (srcLeg, posNext,
                destAirport) is true) and (srcLeg doesn't have a
                next flight or checkConstraintMTT (posibleLeg,
                srcNext, destAirport) is true) then
(27)                if srcLeg and posibleLeg arrive at the same
                    airport then
(28)                    addSwapCandidates (srcLeg, posibleLeg)
(29)                else
                    addCandidatePair (posibleLeg, posNext)
(30)                end if
(31)            end if
(32)        end for
(33)    for each legPair in candidatePairs do
(34)        if checkCrossSwap (pair1, pair 2) is true then
(35)            addSwapCandidates (pair1, pair2)
(36)        end if
    end for
(37)    choosenLegs ← selectSwapCandidate (SwapCandidates)
(38)    executeSwap (choosenLegs)
end procedure

```

Fig.5.5. Pseudocodi del procediment definit per a la cerca i execució de canvis en l'assignació de flotes

De forma similar al procediment descrit per a dur a terme canvis en els horaris, el punt de partida del procediment **executeRefleeting** pren com a base el vol generador d'un mercat seleccionat mitjançant una funció de probabilitat geomètrica, dins d'una llista ordenada de mercats en ordre decreixent segons el seu nivell de *spoil* (nombre de seients buits en l'avió assignat al vol generador del mercat) (1). Partint

d'aquest vol (**sourceLeg**), cal buscar el conjunt de vols **posibleLeg** que sortint del mateix aeroport d'origen que el vol **sourceLeg** (restricció de localització) (2) i tenint assignat un avió de diferent capacitat (ja que d'altra banda, la contribució del canvi seria nul·la) i igual família (restricció de famílies de flota) (3), es compleixin el conjunt de restriccions necessàries que assegurin que l'intercanvi en l'assignació de flotes sigui factible en cadascun dels possibles escenaris que, degut a la configuració del programa de vols, es puguin presentar i que es detallen tot seguit:

1. En el cas en què **posibleLeg** no tingui cap vol programat després en la seva rotació (**posibleLeg** és l'últim vol de la rotació assignada a l'avió que l'opera), es poden considerar els següents escenaris (4-9):

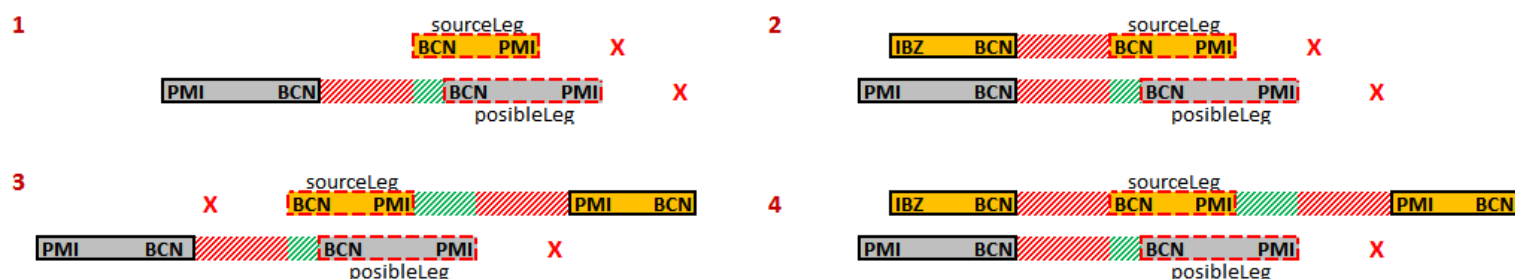


Fig.5.6. Escenaris en què posibleLeg no té programat cap vol després en la seva rotació

2. Si el vol **posibleLeg** es troba al mig de la rotació (està entre dos vols), poden considerar-se les següents situacions (10-18):

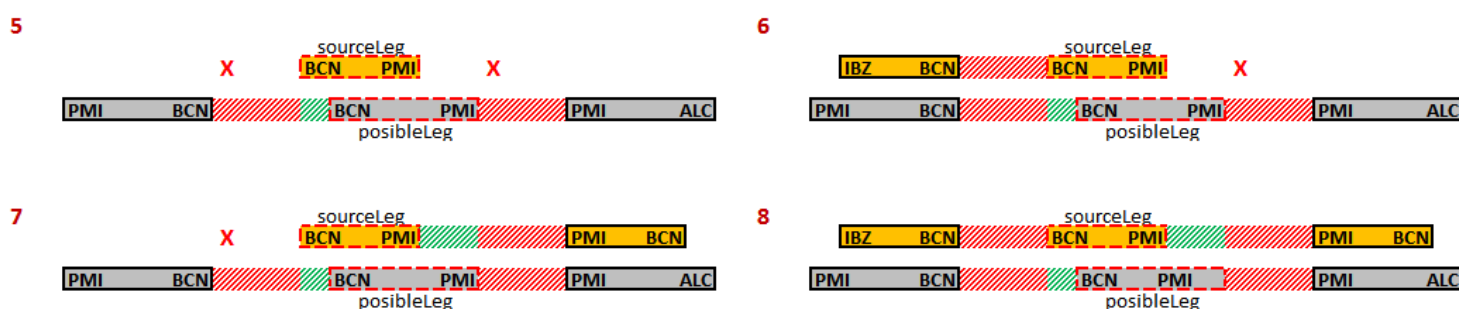


Fig.5.7. Escenaris en què posibleLeg es troba entre dos vols en la seva rotació

3. Si **posibleLeg** és l'únic vol assignat a l'avió que l'opera (la rotació està només composta d'un vol), cal que es contemplin els següents casos (19-25):



Fig.5.8. Escenaris en què posibleLeg és l'únic vol programat per a un determinat avió

4. Finalment, en el cas que **posibleLeg** es trobi a l'inici de la rotació, es consideren els següents casos (26-30):

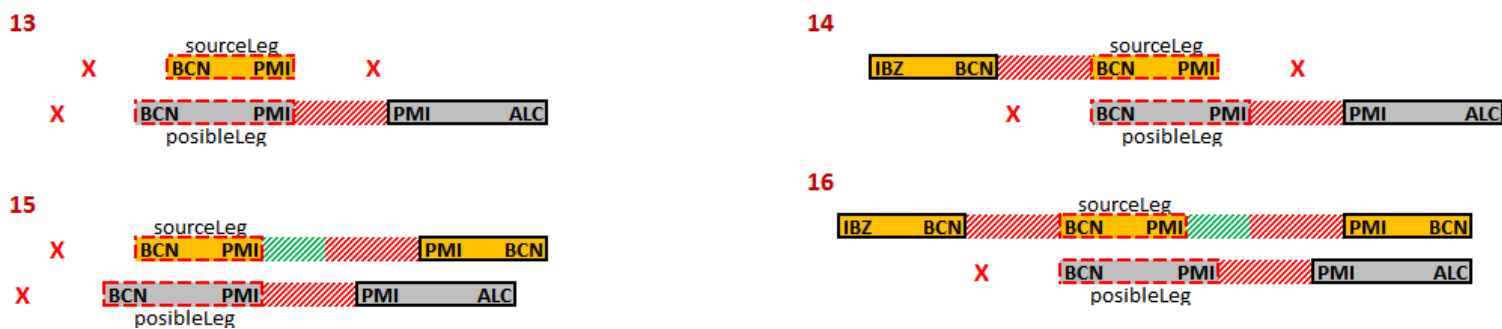


Fig.5.9. Escenaris en què posibleLeg es situa a l'inci de rotació

En tots els casos anteriors, per a que sigui factible la reassignació de flotes entre dos vols o dues parelles de vols, caldrà que, més enllà de les restriccions de diferència de capacitats i família d'aeronaus, es respectin les condicions de localització (els avions han de trobar-se al mateix aeroport per a poder dur a terme el creuament) i de preservació de les escales mínimes a cada aeroport (en les figures anteriors, franges vermelles abans i després de cada vol). Per a assegurar que això es compleix, es fa ús del procediment **checkConstraintMTT** el qual prenent la hora d'arribada (STA) d'un vol, la de sortida (STD) d'un altre i el codi de l'aeroport en què s'ha de produir l'intercanvi de flotes, verifica que es respectin les condicions anteriors. En el cas que l'intercanvi no sigui possible entre dos vols ja que no realitzen la mateixa ruta, caldrà avaluar si és possible un creuament entre parelles de vols; per això, quan es dona aquest cas, s'emmagatzemen les parelles de vols formades pels vols en qüestió (**srcLeg** i **posibleLeg** amb els vols anterior i posterior de les seves respectives rotacions) i se'n valoren posteriorment aquestes condicions a través del mètode **checkCrossSwap** (33-36). Amb tot, arribat aquest punt ja es disposa del

conjunt de vols (vols individuals o parelles de vols) emmagatzemats a la variable **SwapCandidates** que ja garanteixen un intercanvi de flotes factible, d'entre els quals se'n selecciona un de forma aleatòria (37). A continuació, el procediment **executeSwap** realitza els canvis en l'assignació dels avions per a cadascun dels vols involucrats (38).

En el cas d'haver dut a terme amb èxit algun dels dos tipus de canvis, cal regenerar la nova solució. Per a fer-ho, cal crear de nou els mercats, "reassignar" de nou als passatgers als vols, calcular de nou els marges de moviment tant anterior (PreBuff) com posterior (PostBuff) de cadascun dels vols i finalment, recalculer el valor de la funció objectiu associada a la nova solució. En el cas que el valor de la funció objectiu associada a la nova solució **newSol** sigui major al valor de la funció objectiu associada a la millor solució obtinguda fins al moment **bestSol**, s'assigna com a millor solució la nova solució. Aquest procés continua fins que es compleix el criteri que atura la generació de noves pertorbacions; normalment, determinat per temps de càlcul o nombre d'iteracions.

SECCIÓ 4 – EXPERIMENTS I ANÀLISI DE RESULTATS

6. Experiments: disseny, execució i anàlisi de resultats

6.1. Introducció

Havent ja descrit la metodologia de resolució proposada i havent-ne explicat en forma de pseudocodi l'estructura d'aquelles parts de l'algoritme que es consideren d'importància fonamental, tal i com s'apunta en la secció d'objectius plantejats en aquest projecte, resulta essencial realitzar una sèrie d'experiments que permetin avaluar el rendiment de l'algoritme DACRA així com quantificar el potencial de la metodologia desenvolupada i analitzar-ne la qualitat de les solucions generades.

Per a fer-ho, es prendran de referència les característiques generals dels inputs emprats a Jiang (2006) i es duran a terme execucions sobre diferents instàncies del mateix escenari per tal de relativitzar els resultats obtinguts vers als generats mitjançant la metodologia desenvolupada per Jiang; no obstant, aquesta és només una forma de prendre una referència que permeti ajustar les dimensions de les solucions i no és pas una comparació estricta de metodologies. No ho és ja que el treball de Jiang (2006) només dóna detalls generals respecte les característiques dels inputs que utilitza per a generar els resultats que presenta; així doncs, no s'ha tingut accés a un conjunt de dades que poden resultar determinants i crítiques de cara a generar uns o altres resultats i per tant, no es disposa d'un coneixement complet que garanteixi una base de partida comuna sota unes condicions de treball equitatives. Amb tot, es disposarà d'una referència que permetrà validar la coherència dels resultats obtinguts.

D'altra banda, un cop obtinguts els resultats dels experiments executats, es realitzarà un anàlisi dels factors qualitius associats a les solucions generades per tal de valorar i disposar d'uns trets inicials que permetin identificar el tipus d' accions executades per tal de millorar el valor de la solució objectiu.

Finalment, es farà una valoració global dels resultats obtinguts i se n'extrauran un conjunt de conclusions derivades de l'anàlisi d'aquests resultats.

6.2. Experiments

Prenent com a referència els experiments duts a terme a Jiang (2006) i els resultats presentats al seu article, es dissenya un programa d'execucions de l'algoritme DACRA prenent com a inputs diversos conjunts de dades amb elements comuns als que Jiang utilitza i es consideren per tant, diferents instàncies d'un mateix escenari caracteritzat per una sèrie de paràmetres comuns als utilitzats a Jiang (2006). Cal clarificar no obstant, que donada la inaccessibilitat a les dades en qüestió, els inputs utilitzats no són els mateixos que pren Jiang i per tant, no és possible la comparació estricta de resultats més enllà d'una visualització conjunta que serveixi com a referència per a validar i relativitzar la dimensió i coherència dels resultats generats.

Vegem a continuació el conjunt d'elements coneguts pels quals s'han pres els mateixos valors que a Jiang (2006) i constitueixen per tant, el conjunt de paràmetres que defineixen l'escenari comú a cadascuna de les instàncies sobre les quals s'ha executat l'algoritme:

- **Nombre de vols:** 600
- **Tipus de famílies de flota:** 2 famílies de flota; JET i RJ
- **Tipus d'avions:** 7 tipus (models) diferents d'avió amb les següents capacitats en nombre de seients:
 - Família JET:
 - JET1: 190 seients
 - JET2: 150 seients
 - JET3: 124 seients
 - JET4: 132 seients
 - Família RJ
 - RJ1: 86 seients
 - RJ2: 50 seients
 - RJ3: 37 seients
- **Nombre d'aeroports:** En el conjunt del programa de vols es visiten un conjunt de 100 aeroports diferents.

- **Bases:** 1; tots els avions que conformen la flota estan basats en una mateixa base (aeroport) que constitueix el hub de la xarxa que opera la companyia. Això significa que tots els avions inicien i finalitzen la seva rotació programada al mateix aeroport.
- **Temps mínim de connexió :** 25 minuts
- **Temps màxim de connexió:** 180 minuts

A banda dels elements anteriors, hi ha un conjunt de paràmetres dels quals no se'n mostren detalls a Jiang (2006) i que resulten d'importància de cara a l'aplicació de la metodologia desenvolupada ja que poden resultar determinants a l'hora de generar uns o altres resultats. Es considera doncs, que mantenint fixos els valors dels elements descrits anteriorment i generant diferents valors per als paràmetres que a continuació es presenten, es defineixen el conjunt d'instàncies sobre les quals s'executa l'algoritme i del qual se n'extreuen els resultats.

De cara a generar els valors per als paràmetres que a continuació es presenten, s'ha pres com a referència el model d'operació i estructura de costos que presenten companyies aèries amb un model *low cost*: temps d'escala reduïts, vols de curta i mitja distància, baixos costos d'operació amb una forta presència de costos variables i menors costos fixos, tarifes baixes... Per tant, caldrà tenir en compte aquest fet de cara a la valoració dels resultats obtinguts.

- **Costos d'operació:** Caldrà conèixer quins són els costos tant fixos com variables associats a cada tipus d'avió de la flota i a cada ruta. La generació d'aquests valors per als inputs utilitzats s'ha dut a terme prenent com a referència el valor aproximat dels costos d'operació de FR⁸ (Ryanair) per a un avió de 180 places i una etapa mitja de 676 Km amb una repartició del 78 % de costos variables i un 22% de costos fixos. Traslladat a la flota que s'ha descrit, s'obté la següent taula (Fig. 6.1) de costos (€/hora bloc⁹):

8

<http://www.southampton.ac.uk/~jps7/Aircraft%20Design%20Resources/Cost%20data/Airline%20operating%20costs.pdf>

⁹ Cada hora d'operació compresa entre l'instant en què es treuen les falques de les rodes d'un avió per a l'enlairament fins que se li tornen a col·locar quan aterra

Seating Capacity	CV/BH	CF/BH	CT/BH
190	5.488,89 €	1.583,33 €	7.072,22 €
150	4.333,33 €	1.250,00 €	5.583,33 €
124	3.582,22 €	1.033,33 €	4.615,56 €
132	3.813,33 €	1.100,00 €	4.913,33 €
86	2.484,44 €	716,67 €	3.201,11 €
50	1.444,44 €	416,67 €	1.861,11 €
37	1.068,89 €	308,33 €	1.377,22 €

Fig.6.1. Estructura de costos d'operació utilitzats per a realitzar els experiments

- **Temps mínim d'escala:** En cadascuna de les instàncies, es determinaran els temps mínims d'escala per a cada aeroport prenent un valor entre 25 i 45 minuts.
- **Escales:** Les escales en cada aeroport es programaran d'acord amb el temps mínim d'escala d'aquell aeroport i s'hi sumará un *buffer* de temps que oscil·larà entre 0 i 60 minuts en cada cas.
- **Intervals d'arribada:** L'interval d'arribada a cada aeroport (període de temps que determina el mercat associat a l'arribada en aquell aeroport) es determinarà prenent un valor que oscil·larà entre els 20 i els 75 minuts; aquells aeroports en què el seu interval s'acosti a la cota mínima es consideraran destinacions més associades als negocis mentre que aquells aeroports amb un període més ampli, seran més aviat de lleure.
- **Etapa mitja:** La distància dels vols que conformen el programa es determinarà a partir de la seva durada; en aquest cas, es generaran vols amb una duració que oscil·larà entre 45 i els 165 minuts. Assumint una velocitat mitja de creuer de 900 Km/h, els vols generats en cada instància cobriran distàncies compreses entre els 675 Km i els 2475 Km.
- **Variabilitat en les previsions de la demanda respecte la capacitat assignada:** Per tal de generar les previsions de demanda de passatgers associades a cadascun dels vols, es prendrà per referència la capacitat de l'avió assignat originalment a cada vol. La previsió de demanda per a cada vol serà un valor comprès entre el $\pm 30\%$ de la seva capacitat assignada.
- **Previsió de l'ingrés mig:** Per a disposar de la previsió d'ingrés mig per tarifa per vol i passatger, es pren de partida l'estructura de costos presentada anteriorment. Posant per objectiu un benefici net del 30% dels costos (en el cas ideal d'assolir una ocupació del 100%), s'estableix un ingrés mig per minut de vol i passatger de 81 c€. A partir d'aquest valor, depenent de la durada

de cada vol, és possible generar un valor de la previsió d'ingrés mig per passatger en cadascun dels vols que conformen el programa.

Parametres	Jiang (2006)	DACRA
Num of Flights	600	600
Fleet Families	2	2
Aircraft Types	7: (124, 132, 150, 190) (37, 50, 86)	7: (124, 132, 150, 190) (37, 50, 86)
Num of airports	100	100
Num of Fleet Bases	1	1
Fixed cost per BH/ Arcft Type	No especifica	Veure taula de costos (Fig. 6.1)
Variable cost per BH/ Arcft Type	No especifica	Veure taula de costos (Fig. 6.1)
Min CT (min)	25	25
Max CT (min)	180	180
Minimum Tournaround Time (range) (min)	No especifica	(25,45)
Tournaround Buffers (range) (min)	No especifica	(0, 60)
Arrival Interval (range) (min)	No especifica	(20,75)
Flight length range (range) (min)	No especifica	(45,165)
PAX fcst demand variation/ Arcft capacity (%)	No especifica	± 30%
Fcst avarage fare (range: income (c€)/minute)	No especifica	(81,81)

Fig.6.2. Conjunt de paràmetres que defineixen cada escenari i valors emprats

Així doncs, com es mostra en la figura Fig 6.2 anterior, tot input de l'algoritme es defineix a partir d'una sèrie de paràmetres fixos (marcats en vermell) i un altre conjunt de paràmetres aleatoris (marcats en verd) que prenen valors dins d'un interval. En aquest cas en particular, mantenint fixos el conjunt de valors deterministes assignant-los els mateixos valors que s'utilitzen a Jiang (2006) per a dur a terme la secció d'experiments, es prenen un conjunt de 15 instàncies diferents del mateix escenari en què per a cada instància, s'han generat diferents valors dins dels rangs fixats en cadascun dels paràmetres aleatoris. Realitzant 75000 iteracions de l'algoritme per a cadascuna d'aquestes instàncies, s'han obtingut els següents resultats promitjos detallats a la següent taula (Fig. 6.3):

	Daily Avarage	Absolut daily var. (€)	Yearly achivable impact (€)
Revenue Initial Sol (€)	6.197.860,53		
Revenue Best Sol (€)	6.216.586,73		
Var. (%)	0,30%	18.726,20	6.835.063,00
Costs Initial Sol (€)	5.126.483,07		
Costs Best Sol (€)	5.125.591,33		
Var. (%)	-0,02%	-891,73	-325.482,67
Profit initial Sol (€)	1.071.377,47		
Profit Best Sol (€)	1.090.995,40		
Profit Incr. (%)	1,83%	19.617,93	7.160.545,67

Fig.6.3. Taula de resultats obtinguts en l'aplicació de l'algoritme DACRA

La taula anterior mostra els valors promitjos respecte els ingressos, costos i beneficis tant de l'escenari estàtic en què no s'aplica cap metodologia de programació dinàmica de vols (Initial Sol) com els valors generats a l'aplicar l'algoritme DACRA sobre la solució de partida (Best Sol) i se'n mostren els increments en cadascuna d'aquestes dades. Tenint en compte les característiques dels inputs generats per a cadascuna de les instàncies i considerant que s'han generat unes previsions inicials d'ocupació (93 %) i d'ingressos força optimistes (amb un objectiu de marge net del 30 % dels costos en el cas d'una ocupació del 100%) reduint el nivell de flexibilitat de cara a l'aplicació de la metodologia desenvolupada, es considera que els resultats obtinguts són força conservadors.

En conjunt, s'assoleix un increment promig de 1,83% dels beneficis operatius nets per a cada dia d'operació; en aquest cas en particular, aquest increment es tradueix en 19.617,93 € de benefici net adicional per dia. Com s'observa de forma gràfica a la figura Fig. 6.4, un 95% d'aquesta millora s'atribueix a un increment en el volum d'ingressos diaris que és, en promig, del 0,3% o 18.726,20 € addicionals per dia; el 5% restant de la millora correspon a una reducció dels costos operatius que és, en promig, del 0,02% o un estalvi en costos equivalent a 891,73 € diaris. Tenint en compte que aquests són resultats a nivell diari, és fàcil projectar un potencial d'increment dels beneficis nets anuals d'una companyia aèria que opera amb un model low cost quantificable en un total de 7.160.545,67 €/any.

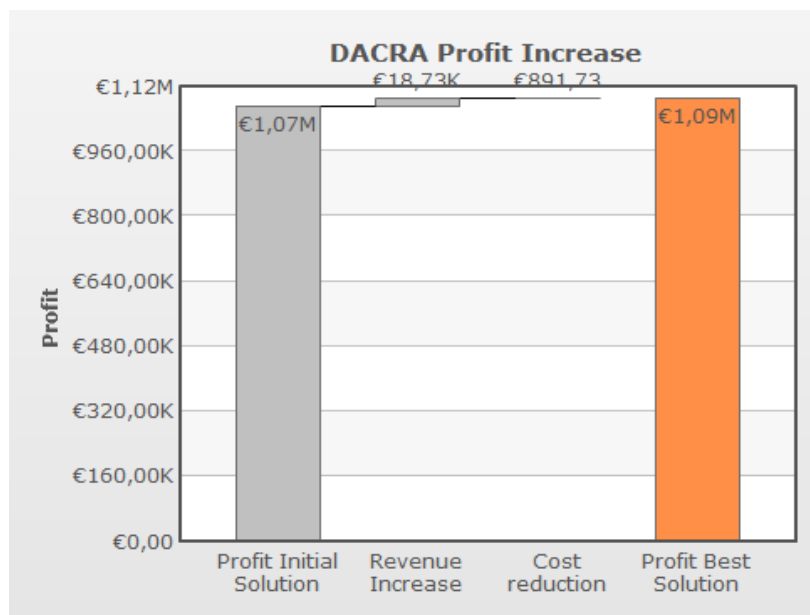


Fig.6.4. Proporció de contribució en la millora assolida per augment d'ngressos i reducció de costos

Amb tot, recordant el tipus d'escenari sobre el qual s'han realitzat els experiments i havent considerat que els resultats obtinguts poden definir una cota inferior del potencial d'aplicació de l'algoritme DACRA, es considera que els resultats obtinguts són molt positius.

De cara a disposar d'un primer esbós que ens permeti prendre consciència de quins són els tipus d'accions que l'algoritme ha executat i poder tenir uns indicadors inicials que possibilitin l'avaluació de la qualitat associada a la solució generada, en la figura Fig. 6.5 es presenten algunes dades complementàries a les exposades anteriorment. A nivell promig dels inputs considerats, s'han ofert un total de 67.072,67 seients/dia; evidentment, aquest és un valor que no varia després de l'aplicació de l'algoritme ja que els avions són els mateixos i per tant, la quantitat de seients disponibles és la mateixa. No obstant, pel que fa als passatgers que ha estat possible acomodar d'acord als seus mercats i itineraris desitjats, després de l'aplicació de l'algoritme s'han aconseguit captar un promig de 193,67 passatgers addicionals per dia; en termes percentuals això suposa un increment de 1pp en el factor d'ocupació global, passant de ser del 93% inicialment al 94%. Aquest increment en la utilització suposa un guany d'eficiència equiparable als ingressos generats per la operació d'un vol diari addicional en una ruta de 1575 Km (per exemple BCN-HAM (Barcelona-Hamburg)) amb un avió de 194 places (per exemple A321) i un factor d'ocupació pràcticament del 100%.

D'altra banda, si s'observen quines accions han estat necessàries per a poder acomodar aquest major nombre de passatgers, en promig s'han hagut de realitzar canvis d'horaris sobre 8,13 vols mentre que els canvis en l'assignació de flotes afecta a un total de 31,07 vols per dia. Així doncs, a partir d'aquesta experiència es deriva que del total de canvis executats, un 21% s'atribueix a canvis en els horaris dels vols (*retiming*) i el 79% restant consisteix en canvis en l'assignació de flotes (*refleeting*). Si bé els anteriors percentatges fan referència al volum de cadascun dels tipus de canvis sobre el total de canvis realitzats, és important precisar que aquest percentatge no reflecteix quina és la contribució de cadascun dels canvis sobre la millora de la funció objectiu; per a saber-ho, caldria conèixer l'impacte promig en termes d'increment dels beneficis globals que porta associat cada canvi realitzat. Des del punt de vista qualitatiu, el fet que hi hagi un molt major volum de canvis de flota que no pas d'horari resulta molt positiu principalment, degut a dos motius: d'una banda, la qualitat del servei percebuda per part d'aquells clients que ja havien comprat un bitllet abans del canvi és molt millor si el seu vol no canvi d'horari (encara que romanguí dins de l'interval de temps que defineix el mercat i la demanda sigui inflexible en aquest rang). D'altra banda, com ja s'havia apuntat amb anterioritat, si el canvi és en l'assignació de flota no existeix la restricció de disponibilitat de slots aeroportuaris que podria restringir els canvis d'horari.

Sold Pax Initial Sol (PAX)	62.540,80
Available Capacity Initial Sol (seats)	67.072,67
LF Initial Sol (%)	0,93
Sold Pax Best Sol (PAX)	62.734,47
Available Capacity Best Sol (seats)	67.072,67
LF Best Sol (%)	0,94
Var LF (PAX)	193,67
Retimed flights (legs)	8,13
Refleeted flights (legs)	31,07

Fig.6.5. Qualitat i accions associades als resultants generats per l'algoritme DACRA

Prenent per referència els experiments duts a terme a Jiang (2006), ja que l'autor realitza experiments sota dos escenaris diferents de demanda, es resumeixen a la taula que es presenta a continuació (Fig. 6.6) els resultats promitjos que s'obtenen de l'aplicació de la metodologia proposada al seu article juntament amb els generats per l'algoritme DACRA.

	Jiang (2006) (\$)	DACRA (€)
Revenue Initial Sol	7.823.951,00	6.197.860,53
Revenue Best Sol	7.903.755,50	6.216.586,73
Var. (%)	1,02%	0,30%
Costs Initial Sol	5.929.789,00	5.126.483,07
Costs Best Sol	5.934.826,50	5.125.591,33
Var. (%)	0,08%	-0,02%
Profit initial Sol	1.894.162,00	1.071.377,47
Profit Best Sol	1.968.929,00	1.090.995,40
Profit Incr. (%)	3,95%	1,83%

Fig.6.6. Taula de relació amb els resultats obtinguts a Jiang (2006)

Simplement observant les dimensions dels valors generats per a cadascun dels elements presentats, ja s'assoleix l'objectiu que es persegueix al presentar l'anterior taula "comparativa": com s'aprecia, els resultats obtinguts després de l'aplicació de la metodologia desenvolupada en aquest projecte, conserven una magnitud que és perfectament coherent amb els resultats presentats a Jiang (2006) i es consideren per tant totalment raonables i realistes. Aquest fet constitueix un argument més de cara a confirmar la validesa dels resultats obtinguts.

Pel que fa als costos computacionals derivats de la generació de resultats utilitzant cadascuna de les metodologies, Jiang només dóna informació d'aquests elements en experiments executats sobre dues instàncies diferents a les associades amb els resultats presentats anteriorment. Ja que resulta

interessant mostrar conjuntament els valors d'aquests paràmetres en cadascun dels casos, es mostren a la següent taula (Fig. 6.7):

	Jiang (2006)	DACRA
Profit increase (%)	2,11%	1,83%
Solution Time	15 hours	32,5 minutes

Fig.6.7. Taula de costos computacionals associats a l'obtenció de solucions

Com s'observa, la diferència en els temps de còmput per a l'obtenció d'una solució són d'una diferència molt considerable. Així doncs, encara que l'algoritme DACRA assoleixi solucions pseudo òptimes, es considera que ja genera resultats molt bons en uns temps de càlcul que, al millor del meu coneixement, són els més reduïts observats fins al moment per a l'obtenció de solucions al problema de la programació dinàmica de vols. Amb tot, el fet que l'algoritme dissenyat permeti generar solucions prou bones en poc temps computacional, constitueix un atribut de gran valor ja que permet l'aplicació de la metodologia pràcticament a temps real; és a dir, el programa de vols per a una data concreta es pot anar actualitzant amb els inputs a temps real que es generin respecte als canvis en les previsions de la demanda de passatgers per a cadascun dels vols, possibilitant un bon ajustament quasi de forma simultània.

SECCIÓ 5 – CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR

7. Conclusions

En aquest projecte s'ha dut a terme un estudi detallat en relació al problema de la programació dinàmica de vols atenent a demandes estocàstiques, prèviament discutit per autors com Berge i Hopperstad (1993) o Jiang (2006) entre d'altres, i s'ha concebut, dissenyat, implementat i validat una metodologia de resolució innovadora basada en un procés meta heurístic que ha permès la generació de solucions pseudo-òptimes en temps de còmput reduïts.

Per a fer-ho, ha estat necessari en primer lloc, realitzar una descripció detallada i disposar de la base teòrica fonamental per a suportar un enfocament encartat i complert del problema a l'hora de desenvolupar la metodologia proposada i derivar-ne les conclusions extretes. Amb aquest objectiu, s'ha donat inici al projecte amb una introducció que ha servit com a presentació genèrica de la temàtica tractada i s'ha aportat el marc conceptual necessari per a comprendre i contextualitzar el problema de la programació de vols així com el conjunt d'activitats que hi estan estretament vinculades i que hi tenen una afectació directa. Tot seguit, com resulta essencial per a dur a terme qualsevol treball d'investigació i comptar amb una base sòlida de parida, s'ha dut a terme un anàlisi bibliogràfic en què s'han estudiat les diferents aproximacions realitzades al problema des dels seus inicis fins a descriure'n l'estat actual de la qüestió. D'aquesta manera, inicialment s'ha realitzat una revisió cronològica en què s'ha seguit l'evolució del problema al llarg dels anys i en una secció aïllada, s'ha dut a terme un anàlisi més exhaustiu en relació a l'estudi que ha abordat el problema tractat en major detall i que s'ha considerat principal referència i pilar central a l'hora de realitzar la contribució original presentada.

Comptant ja amb una base teòrica prou sòlida, s'ha donat continuïtat a la memòria amb una descripció detallada del problema i la presentació de la metodologia desenvolupada; s'han descrit quins són els conjunts de dades necessàries a tenir en compte, els conceptes fonamentals utilitzats en la metodologia desenvolupada, la descripció de la funció objectiu concebuda així com la descripció dels tipus de canvis proposats i el conjunt de restriccions que els afecten. Tot seguit, s'ha descrit de quina manera ha estat implementada la metodologia desenvolupada i s'han exposat i explicat en forma de pseudocodi aquelles parts de l'algoritme que s'han considerat de major rellevància.

Finalment, per tal de verificar, validar i analitzar el rendiment i qualitat de les solucions generades per l'algoritme desenvolupat, s'ha dissenyat i executat un programa d'experiments en què s'ha sotmès l'algoritme a diferents instàncies del problema a partir de les quals s'han extret una sèries de resultats promitjos que han estat validats i posteriorment discutits i analitzats.

Amb tot, de la valoració conjunta de les activitats dutes a terme en aquest projecte i de l'anàlisi dels resultats obtinguts, se'n deriven una sèrie de conclusions que es resumeixen tot seguit:

- En primer lloc, no hi ha cap mena de dubte que el problema de la programació dinàmica de vols és un problema que val molt la pena estudiar tenint en compte el context competitiu actual present a la indústria del transport aeri i la creixent necessitat per part dels operadors aeris de millorar la seva eficiència productiva de cara a generar propostes que siguin més atractives per als clients finals. La metodologia desenvolupada en aquest treball ja constitueix una aportació de valor possibilitant un increment net dels beneficis operatius sense la necessitat de realitzar inversions addicionals i servint-se exclusivament de l'estructura patrimonial de la qual ja disposa la companyia aèria en qüestió; constitueix doncs, una fórmula per a incrementar el rendiment dels actius disponibles a la companyia sense la necessitat d'incórrer en cap tipus de cost d'inversió addicional.
- D'altra banda, l'experiència duta a terme també posa de manifest que es tracta d'un problema de gran complexitat, que cal conèixer en profunditat per a poder contribuir-hi de forma rellevant. Aquesta complexitat es fa palesa d'una banda en la necessitat d'entendre les interaccions existents entre les diferents activitats de programació així com la construcció i programació de vols, prenent consciència del conjunt de restriccions que l'afecten i que cal tenir en compte a l'hora de desenvolupar metodologies que l'hagin d'alterar. D'altra banda, encara que aquesta és una apreciació subjectiva, l'abstracció dels conceptes que envolten el problema en dificulten una concepció formal i una posterior implementació tècnica, un cop dissenyada una meta heurística de resolució.
- Es considera que els resultats generats a partir de l'aplicació pràctica i experimentació de la metodologia desenvolupada són coherents i constitueixen doncs, una nova font de referència respecte les alternatives de solució d'aquest problema. D'aquesta manera, els resultats presentats contribueixen aportant uns paràmetres entorn als quals poder quantificar i relativitzar el potencial de les tècniques emprades per a la resolució de problemes relacionats amb la programació dinàmica de vols.
- L'algoritme DACRA desenvolupat en aquest projecte ja genera uns resultats que es consideren molt bons tenint en compte les característiques dels escenaris sobre els quals ha estat executat i que es tracta d'un mètode meta heurístic i no pas d'un model d'optimització exacta que permet obtenir solucions prou bones en temps de còmput reduïts. A més, entre d'altres avantatges, l'algoritme proposat és capaç de generar diverses alternatives de solució possibilitant la valoració qualitativa més enllà de la quantitativa de cara a oferir un ventall d'alternatives diverses.

Finalment, tenint en compte l'objectiu global plantejat a l'inici del projecte i prenent per referència l'itinerari definit a partir dels objectius parcials formulats, es considera que s'ha donat una resposta satisfactòria a cadascun d'aquests objectius possibilitant en conjunt, l'assoliment de l'objectiu global plantejat.

8. Futures línies de treball

En aquest projecte s'ha concebut i presentat una metodologia innovadora que ha constituït una alternativa de resolució a les eines ja existents de cara a donar solució al problema de la programació dinàmica de vols atenent a demandes estocàstiques. Evidentment, la metodologia presentada mostra una primera versió de l'algoritme DACRA i es considera per tant, que obre moltes portes de cara a la seva millora i a l'obtenció de millors resultats futurs.

Fent una revisió dels resultats obtinguts en aquest projecte i considerant-ne les conclusions extretes, s'enumeren a continuació les que es consideren principals i possibles línies futures de treball que poden donar continuïtat al treball presentat:

- Per tal de millorar els resultats generats per l'algoritme DACRA i assolir unes millores en els beneficis operatius que superin el 1,8% obtingut, es proposa realitzar les modificacions pertinents a l'algoritme que li permetin adoptar l'estructura d'un ILS (*Iterative Local Search*). Per a fer-ho, seria necessari incloure un mecanisme que, durant el procés iteratiu, donés crèdit per a seleccionar solucions base que tinguessin un valor de la funció objectiu associada pitjor al de la millor solució obtinguda fins al moment, amb l'objectiu d'escapar de màxims locals i poder explorar altres àrees en l'espai de solucions que permetessin a l'algoritme generar solucions més pròximes a màxims absoluts (ja que el problema es planteja com a un problema de maximització de la funció objectiu).
- Seria interessant dissenyar un conjunt de mecanismes i indicadors que permetessin conèixer amb més precisió quins són els tipus de canvis que es generen amb més freqüència: es podrien analitzar entre quins tipus d'avions és més freqüent que es duguin a terme intercanvis de flota o si els intercanvis de flota afecten majoritàriament a un tipus de vols concrets amb unes característiques de mercat determinades... També seria de gran utilitat conèixer quina és la amplitud dels moviments (en minuts) en promig de dur a terme canvis d'horaris així com si hi ha vols que solen estar infradimensionats i que per tant són més propensos a atraure canvis d'horari per a

possibilitar una major inclusió de seients al mercats que defineixen. D'aquesta manera, més enllà de rebre els beneficis monetaris derivats de l'increment dels beneficis operatius, la metodologia també constituiria una font important per a extreure coneixement que suporti la presa de decisions estratègica de la companyia aèria: a través de l'anàlisi de les reassignacions de flota es poden projectar futures comandes d'avions i projectes de renovació de flota, detectar en quins mercats és més freqüent que es duguin a terme canvis per tal de reajustar-ne la capacitat pot indicar que les previsions de demanda no reflecteixen la realitat del mercat, observar els canvis en els horaris d'operació dels vols pot ajudar de cara a la planificació estratègica de peticions de slots aeroportuaris...

- Una altra contribució que es podria fer a la feina ja realitzada podria consistir en avaluar el comportament aïllat i posteriorment conjunt de cadascun dels tipus de canvis. D'aquesta manera, seria possible identificar el potencial atribuïble a cada tipus d'alteració observant-ne l'impacte que tenen per separat sobre el valor de la funció objectiu. Realitzant proves en què es duguin a terme els dos tipus de canvis es podria observar, a més, si existeixen sinèrgies positives que afavoreixen l'aplicació conjunta dels canvis d'horari i els intercanvis en l'assignació de flotes. D'altra banda, es podria esbrinar si existeix algun tipus d'ordre en l'aplicació d'aquests canvis que pugui portar a millors resultats.
- Seria també de molt valor conèixer quines són les característiques en els inputs que resulten més crítics de cara a determinar el potencial de l'aplicació de la metodologia desenvolupada; d'aquesta manera, seria possible identificar sobre quins perfils d'operadors aeris o sobre quines estructures en la programació de vols en particular, l'algoritme podria aportar millores més significatives. Per a fer-ho, es podria construir un model de regressió multivariant en què prenent com a variable dependent l'increment en els beneficis operatius i generant diversos valors per als predictors (conjunt de paràmetres que defineixen els escenaris i inputs de l'algoritme), es poguessin analitzar les interferències existents entre aquestes variables i poder determinar quins són aquells paràmetres d'entrada que tenen una major influència sobre l'increment en els beneficis operatius generats per l'algoritme.

9. Referències bibliogràfiques

- Barnhart, C., Jiang, H., 2013. *Robust Airline Schedule Design in a Dynamic Scheduling Environment*. *Computers & Operations Research* 40.3: 831–840.
- Bazargan, Massoud., 2010. *Airline Operations and Scheduling*. Ashgate Publishing, Ltd. Print.
- Berge, M. E. and Hopperstad, C. A., 1993. *Demand Driven Dispatch: A Method for Dynamic Aircraft Capacity Assignment, Models and Algorithms*. *Operations Research*, 41(1):pp. 153–168. Special Issue on Stochastic and Dynamic Models in Transportation.
- Bish, E. K., Suwandechochai, R., and Bish, D. R., 2004. *Strategies for Managing the Flexible Capacity in the Airline Industry*. *Naval Research Logistics*, 51:pp. 654–684.
- Farkas, A., 1995. *The Influence of Network Effects and Yield Management on Airline Fleet Assignment Decisions*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Flint, P., 2002. *No Peaking*. *Air Transport World*, 39(11):pp. 22–27.
- Glover, F., Glover, R., Lorenzo, J., and McMillan, C., 1982. *The Passenger-Mix Problem in the Scheduled Airlines*. *Interfaces*, 12(3):pp. 73–79.
- Jiang, H., 2006. *Dynamic Airline Scheduling and Robust Airline Schedule De-Peaking*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Kniker, T., 1998. *Itinerary-Based Fleet Assignment*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Rosenberger, J. M., Schaefer, A. J., Goldsman, D., and Johnson, E. L., 2002. *A Stochastic Model of Airline Operations*. *Transportation Science*, 36:pp. 357–377.
- Sherali, H. D., Bish, E. K., and Zhu, X., 2005. *Polyhedral Analysis and Algorithms for a Demand-Driven Refueling Model for Aircraft Assignment*. *Transportation Science*, 39(3):p. 349.
- Soumis, F., Ferland, J., and Rousseau, J.-M., 1981. *MAPUM: A Model for Assigning Passengers to a Flight Schedule*. *Transportation Research, Part A*, 15A:pp. 155–161.
- Talluri, K. T., 1996. *Swapping Applications in a Daily Airline Fleet Assignment*. *Transportation Science*, 30(3): pp. 237–248.
- Talluri, K. T., 2001. *Airline Revenue Management with Passenger Routing Control: A New Model with Solution Approaches*. *International Journal of Services Technology and Management*, 2(1/2): pp. 102–115.

- Warburg, Valdemar et al., 2008. *Dynamic Airline Scheduling: An Analysis of the Potentials of Refleeting and Retiming*. *Journal of Air Transport Management* 14.4: 163–167.
- Yan, Shangyao, Ching-Hui Tang, and Tseng-Chih Fu., 2008. *An Airline Scheduling Model and Solution Algorithms Under Stochastic Demands*. *European Journal of Operational Research*, 190.1: 22–39.
- Yan, Shangyao, and Chich-Hwang Tseng., 2002. *A Passenger Demand Model for Airline Flight Scheduling and Fleet Routing*. *Computers & Operations Research*, 29.11: 1559–1581.
- Yan, S., Tang, C.-H., and Lee, M.-C., 2007. *A Flight Scheduling Model for Taiwan Airlines under Market Competitions*. *Omega*, 35: pp. 61-74.

ANNEX